

BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

No. 44, Julio de 2018

ISSN 0120 - 3630



Escenario de riesgo por Caída de Rocas (ERS-6).
Motta-Pascuas et al.

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



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:boletde-ciencias-de-la-tierra-&catid=43:revistas-&Itemid=215. Los correos electrónicos de la revista son: rbct_med@unal.edu.co, Teléfono y Fax: (57-4) 425 53 43

Foto carátula: Figura 3. Escenario de riesgo por Caída de Rocas (ERS-6).

Artículo: Identificación, análisis y evaluación de riesgos asociados a la actividad minera de oro en el Municipio de Marmato, Caldas

Autores: Andrea Jimena Motta-Pascuas, Mario Alfonso Ustariz-Durán & Oswaldo Ordoñez-Carmona

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: Enero y Julio
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

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

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

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

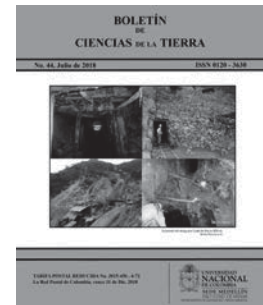
SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

CONTENT

Emerging technologies for tailings disposal: opportunities for Colombian practice Lorena N. Beltrán-Rodríguez, Joan M. Larrahondo & Diego Cobos	5
Identification, analysis and evaluation of risks associated with gold mining in Marmato, Caldas Andrea Jimena Motta-Pascuas, Mario Alfonso Ustariz-Durán & Oswaldo Ordoñez-Carmona	21
Characterization of clays materials from Guaviare river, La Paz, Colombia David Landinez, Martha Calvo & Carolina Cárdenas	31
Incorporation of random uncertainty of soil properties in geostatistic analysis. Application to the reliability design of shallow foundations Maddy Alejandra Munévar-Peña a, Alfonso Mariano Ramos-Cañón b & Luis Felipe Prada-Sarmiento	38
Application software in Python 3 for calculating the second-order tensors Jelínek's statistics in anisotropy of magnetic susceptibility data Exneyder A. Montoya-Araque & Ludger O. Suarez-Burgoa	49

Our cover
Image alluding to Article:
Identification, analysis and evaluation of risks associated with gold mining in Marmato, Caldas
Authors:
Andrea Jimena Motta-Pascuas, Mario Alfonso Ustariz-Durán & Oswaldo Ordoñez-Carmona



CONTENIDO

Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia Lorena N. Beltrán-Rodríguez, Joan M. Larrahondo & Diego Cobos	5
Identificación, análisis y evaluación de riesgos asociados a la actividad minera de oro en el Municipio de Marmato, Caldas Andrea Jimena Motta-Pascuas, Mario Alfonso Ustariz-Durán & Oswaldo Ordoñez-Carmona	21
Caracterización de material arcilloso obtenido del río Guaviare, vereda de La Paz, Colombia David Landínez, Martha Calvo & Carolina Cárdenas	31
Incorporación de la incertidumbre aleatoria de las propiedades del suelo en la geoestadística. Aplicación al diseño de cimentaciones basado en confiabilidad Maddy Alejandra Munévar-Peña a, Alfonso Mariano Ramos-Cañón b & Luis Felipe Prada-Sarmiento	38
Software de aplicación en Python 3 para el cálculo de la estadística de tensores de segundo orden de Jelinek en datos de anisotropía de susceptibilidad magnética Exneyder A. Montoya-Araque & Ludger O. Suarez-Burgoa	49

Nuestra carátula
Imagen alusiva al artículo:
Identificación, análisis y evaluación de riesgos asociados a la actividad minera de oro en el Municipio de Marmato, Caldas
Autores:
Andrea Jimena Motta-Pascuas, Mario Alfonso Ustariz-Durán & Oswaldo Ordoñez-Carmona



Emerging technologies for tailings disposal: opportunities for Colombian practice

Lorena N. Beltrán-Rodríguez ^a, Joan M. Larrahondo ^a & Diego Cobos ^b

^a *Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. lorena.beltran@javeriana.edu.co, jlarrahondo@javeriana.edu.co,*

^b *Dynami Geoconsulting, Medellín, Colombia. cobos@dynamigc.com*

Received: July 27th, 2017. Received in revised form: March 19th, 2018. Accepted: April 15th, 2018.

Abstract

While Colombia is a country with long mining tradition, expertise and regulation on large-scale mining-waste disposal facilities are scarce. This article describes the current state of the practice of mining waste management in Colombia, particularly tailings, as well as the opportunities and limitations towards the adoption of modern technologies. The traditional practices for tailings management around the world were reviewed, as well as its technical and regulatory aspects in Colombia. In addition, recent technical literature was studied relating emerging technologies for tailings management, focusing on thickening, filtration, cemented-paste backfilling, “piggy-backing”, and submarine tailings disposal. Furthermore, the Colombian regulatory and technological environment was analyzed considering the possible implementation of modern technologies. It is concluded that such emerging technologies minimize mining-project footprints compared to conventional disposal structures, though submarine disposal should currently be avoided. Colombia urgently requires to educate skilled professionals able to tackle the modern massive management of mining waste.

Keywords: tailings; waste rock; tailings dams; tailings storage facilities; thickened tailings; tailings paste; piggy-backing; submarine tailings disposal; acid drainage.

Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia

Resumen

Aunque Colombia es un país de amplia tradición minera, las experiencias y reglamentación sobre grandes estructuras de disposición de residuos mineros son escasas. Este artículo describe las prácticas actuales de manejo de residuos mineros en Colombia, particularmente relaves, al igual que las oportunidades y limitaciones para la adopción de tecnologías modernas. Para este manuscrito, se revisaron las prácticas mundiales tradicionales y los aspectos técnico-normativos en Colombia. Adicionalmente, se estudió bibliografía reciente sobre tecnologías emergentes para manejo de relaves, particularmente espesamiento, filtrado, retrolonado, realce y disposición submarina. Finalmente, se analizó la situación normativa y tecnológica en Colombia de cara a la posible adopción de tecnologías modernas. Se concluye que las tecnologías emergentes minimizan el gran pasivo que dejan las estructuras convencionales, aunque actualmente la disposición submarina debe evitarse. En cualquier caso, el país requiere prontamente desarrollar capital humano con competencias para abordar el manejo moderno y masivo de residuos mineros.

Palabras clave: relaves; estériles; presas de relaves; estructuras de almacenamiento de relaves; relaves espesados; pasta de relaves; realce de presas; disposición submarina; drenaje ácido.

1. Introducción

Los minerales continúan siendo un recurso fundamental a escala global. Para satisfacer la creciente demanda mundial e incluso para lograr reducir las emisiones de carbono

asociadas con las metas de desarrollo sostenible fijadas en 2015 por la Organización de Naciones Unidas y el Acuerdo de París sobre cambio climático, la actividad minera requiere continuidad y crecimiento [1]. En efecto, la implementación a gran escala de “tecnologías limpias” requiere

How to cite: Beltrán-Rodríguez, L.N., Larrahondo, J.M. and Cobos, D., Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, 44, pp. 5-20, Julio, 2018.

infraestructura y fabricación de equipos que demandan enormes cantidades de minerales, por ejemplo, aquéllos que contienen elementos de tierras raras.

Todos los tipos de explotación minera tienen en común la extracción y concentración (beneficio) de uno o varios minerales provenientes de la corteza terrestre. Para tal fin, la molienda constituye una de las actividades más importantes y a la vez más costosas del proceso de beneficio de un mineral. Como resultado de la molienda y beneficio, posterior a extraer los metales objetivo, se producen partículas residuo, desde muy finas (tamaño arcilla y limo) hasta tamaño arena fina [2]. El conjunto de estas partículas se denomina “relaves” o “colas”.

Dado que, incluso en yacimientos con relativamente alta concentración de metal objetivo, la cantidad de roca “estéril” sobrepasa significativamente la cantidad de mineral valioso, las cantidades de residuos sólidos producidos son grandes. Por ejemplo, el contenido de cobre en un yacimiento típico de buen grado solamente alcanza 0.25% [2], y en yacimientos de oro, apenas es recuperable aproximadamente 1 g de metal por tonelada de roca [3].

La actividad extractiva minero-energética produce entonces residuos sólidos, principalmente relaves y roca “estéril”, los cuales convencionalmente se disponen sobre superficie en zonas topográficamente convenientes y en ocasiones mediante estructuras de contención tipo presa. Estas prácticas implican grandes áreas de intervención y, en el largo plazo, pasivos ambientales y sociales posteriores al cierre de la mina, más cuando, bajo ciertas circunstancias, la interacción de los residuos con el agua y el medio ambiente pueden llegar a liberar contaminantes.

Actualmente existen tecnologías modernas que buscan optimizar las condiciones de disposición final de los residuos, reduciendo el impacto sobre su entorno. Estas tecnologías emergentes incluyen espesado de relaves, filtrado de relaves, retrolenado de galerías con pasta de relaves, realces (“piggy-backing”) y disposición submarina, siendo esta última una tecnología muy controversial y de hecho restringida en múltiples países [4]. Los anteriores métodos han venido desarrollándose en países mineros con tradición de grandes estructuras de contención. En Colombia, se tiene poca experiencia y conocimiento tanto en grandes estructuras de contención como en nuevas tecnologías y prácticamente se carece de reglamentación relacionada. No obstante, algunos nuevos proyectos mineros de diferente escala ya están implementando o planean implementar algunos de estos métodos, por lo cual es fundamental conocer las ventajas, desventajas y posible aplicabilidad de los mismos. Una gestión integral de los residuos mineros con enfoque hacia la protección del medio ambiente trae grandes beneficios económicos y sociales [5].

El objetivo de este artículo es describir las prácticas actuales de manejo de residuos mineros en Colombia, particularmente relaves, al igual que las oportunidades y limitaciones para la adopción de tecnologías modernas de disposición final.

2. Contexto y antecedentes

2.1. Relaves y roca “estéril”

La roca denominada “estéril” constituye uno de los residuos más voluminosos en la industria minera. Cuando se

explota el mineral con métodos de minería subterránea, los residuos gruesos de roca se originan a menudo en la excavación del eje de la mina, los pozos mineros y otras áreas. La producción de residuos de roca es muy diferente en distintas minas debido a la geometría del yacimiento, al programa de desarrollo de la explotación y a la capacidad de extracción de la mina subterránea. En todo caso, la cantidad de residuos de roca en una mina a cielo abierto generalmente es mayor que en una mina subterránea [5].

Por su parte, los relaves o “colas” son los principales residuos del proceso de beneficio de minerales. Estos residuos están compuestos fundamentalmente por el mismo material presente in-situ en el yacimiento, al cual previamente se le ha extraído la fracción con mineral valioso. Los relaves conforman así una “pulpa” de partículas finas que se produce en las plantas de concentración húmeda de especies minerales y “estériles” que han experimentado una o varias etapas del circuito de molienda fina [6]. Los relaves son materiales que difieren considerablemente de los suelos naturales en cuanto a sus propiedades índice, por ejemplo, gravedad específica normalmente mayor que 3.0 [7,8] y susceptibilidad a lixiviación y drenaje ácido o alcalino [9-11].

La producción y la disposición controlada de relaves y “estériles” se han convertido en factores clave para el desarrollo sostenible de la industria minera. Estadísticas recientes muestran que, por ejemplo, en China se vierten más de 500 millones de toneladas de relaves cada año y la tasa de reaprovechamiento es de menos del 7% de la tasa de producción. El método más común de disposición de relaves es bombeo de lechada hacia una estructura de contención de relaves, o “Tailings Storage Facility” (TSF) [5]. Actualmente, en la industria minera y de disposición, se prefiere utilizar el término “TSF” en lugar de “presa de relaves” [3].

2.2. Estructuras de contención

Hasta hace solo algunas décadas, era común en Chile y en otros países de tradición minera disponer relaves derivados de las operaciones minero-metalúrgicas vertiéndolos informalmente sobre cuerpos de agua, valles o incluso al mar [6]. Cuando estos sitios no eran accesibles, se solía acumular los relaves en áreas de contención amuralladas con terraplenes levantados con los mismos relaves. Sin embargo, una vez se agotaba el yacimiento, estos depósitos eran abandonados. El desarrollo de esta tecnología tipo “presa de relaves” tuvo lugar sobre una base principalmente empírica y mayormente relacionada con las prácticas de construcción y equipo disponible en la época.

Durante las décadas de 1950 y 1960, desde Norteamérica se empezaron a aplicar y refinar principios fundamentales de ingeniería de presas sobre presas de relaves. Las fallas de origen sísmico de varias presas de relaves en Chile recibieron gran atención y demostraron ser un factor clave en las primeras investigaciones del fenómeno de la licuación sísmica. Por ejemplo, la falla por licuación de la presa El Cobre (1965) ocurrida durante el sismo de La Ligua, provocó que los relaves viajaran 12 km aguas abajo destruyendo completamente la municipalidad de El Cobre y dejando un saldo de 200 muertos.

La preocupación por posible contaminación del agua subterránea y las medidas para reducirla se abordaron entre las décadas de 1970 y 1980, particularmente en relación con relaves de uranio. En efecto, durante este tiempo el foco de atención se volcó no solo sobre la estabilidad geotécnica de las estructuras de contención, sino también sobre posibles efectos químicos y transporte de contaminantes. Como consecuencia, alrededor de 1990 se reconoció que los depósitos de relaves, aún aquellos geotécnicamente estables, no pueden abandonarse sin considerar posibles efectos de largo plazo sobre el ambiente, la salud y la seguridad [12].

Como ejemplos de grandes estructuras modernas para manejo de relaves se encuentran la presa de relaves de Antamina en Perú y las estructuras en los estados de Ontario y British Columbia en Canadá [13,14]. La presa de Antamina (Fig. 1) es una presa de enrocado con cara de concreto, de 135 m de altura y capacidad para almacenar 570×10^6 Ton de material durante su vida útil. La cara aguas arriba de la presa adicionalmente está protegida por geomembrana de polietileno de alta densidad para evitar posibles filtraciones desde el embalse de relaves. Como obras complementarias del proyecto existen túneles de drenaje, inyecciones de concreto y canales colectores de agua de lluvia, y comprende instrumentación para monitoreo de asentamientos, cambios de niveles de agua y filtraciones [15].

En British Columbia y Alberta, Canadá, desde hace varios años se viene desarrollando minería a cielo abierto de cobre y arenas bituminosas a gran escala. Respectivamente, la producción de residuos es cercana a 150,000 y 250,000 toneladas diarias [14], exigiendo el almacenamiento seguro de estos enormes volúmenes de relaves. La explotación de arenas bituminosas por parte de las firmas Syncrude y Suncor es la más grande con operaciones de producción de crudo sintético.

No obstante, estadísticamente las presas de contención de relaves tienen aproximadamente 100 veces más probabilidad de falla que las presas de contención de agua [17,18]. En la Tabla 1 se presenta un resumen de algunas fallas significativas de presas de relaves en el mundo, compiladas de un total de 103 de fallas registradas entre 1960 y 2016 en la base de datos WISE [19].



Figura 1. Presa de relaves Antamina, Perú, vista desde aguas arriba.
Fuente: [16]

3. Manejo de relaves en Colombia

3.1. Generalidades

La información disponible sobre el manejo de relaves (colas) en Colombia es escasa y dispersa, por lo cual un diagnóstico completo y preciso sobre el tema es un desafío. La minería en Colombia ha ganado participación importante dentro de la actividad económica del país durante las últimas cuatro décadas [20]. En efecto, el sector de explotación de minas y canteras pasó de representar el 1.6% del PIB en 1975 a representar el 11.3% del mismo en 2012. Sin embargo, gran parte de este crecimiento sectorial se debe en realidad a la extracción de petróleo y no específicamente a la explotación de minerales. La explotación de hidrocarburos duplicó su participación en el PIB, de 4.5% a 8.2%, entre 2000 y 2013, mientras que el resto del sector aumentó su participación de 1.5% a 2.5% del PIB durante el mismo periodo. La demanda creciente de minerales por parte de economías emergentes de Asia, particularmente India y China, explica en parte este crecimiento [21]. Esta demanda creciente se espera que se mantenga hacia futuro de acuerdo a los pronósticos de crecimiento del PIB mundial hacia 2030, junto con una tendencia al alza en los precios de los principales minerales.

Ahora bien, al comparar el peso de la minería, sin hidrocarburos, dentro del PIB de países mineros como Perú, Chile, Australia y Suráfrica, la importancia en el PIB de este sector en Colombia es evidentemente baja. Mientras que en Australia la minería, sin hidrocarburos, representa cerca del 25% del PIB, en Chile alcanza el 15% y en Perú y Suráfrica se encuentra cerca del 10%.

El plan nacional para el desarrollo minero, visión año 2019 [22], resalta que el desempeño del sector minero en el país desde mediados de los años 90 registra un importante crecimiento en volumen, valor de producción y exportaciones, con lo cual su aporte a la economía colombiana se ha sostenido e incluso ha compensado la baja registrada en la producción de hidrocarburos. Lo anterior se sustenta fundamentalmente en el desarrollo del sector minero del carbón y en menor proporción en minerales preciosos y ferróníquel. Según la Unidad de Planeación Minero Energética [22], actualmente al menos 15 departamentos colombianos han desarrollado programas de promoción y fomento minero y han gestionado recursos para su financiación. Entre ellos, Antioquia, Bolívar, Boyacá, Cauca, Nariño y Putumayo cuentan con planes de desarrollo minero. Otros municipios como Santacruz de Guachaves (Nariño) y Yumbo (Valle del Cauca) cuentan con planes de desarrollo minero a nivel local.

La problemática de contaminación por residuos de mercurio provenientes de la minería extractiva de oro, específicamente la que se desarrolla de manera informal, es tal vez la más preocupante [23]. A esta problemática se suman los problemas sociales de una población minera generalmente vulnerable que desconoce los riesgos que acarrea la manipulación del mercurio. En este sentido, dentro de las operaciones de beneficio y transformación en las minas, se destaca la disposición informal e inadecuada de las

Tabla 1.

Algunas fallas notables de presas de relaves en el mundo.

Fecha	Nombre / Localización	Míneral	Tipo de Falla	Consecuencias
28/03/1965	Cerro Negro, Chile	Cobre	Licuefacción e inestabilidad de taludes inducidas por sismo	50,000 Ton de relaves fluyeron 5 km aguas abajo
19/07/1985	Stava, Trento, Italia	Fluorita	Márgenes de seguridad insuficientes; construcción deficiente de tubería de decantación	Flujo de relaves 4.2 km aguas abajo a velocidad de 90 km/h; 268 personas muertas y 62 edificaciones destruidas. 200,000 m ³ de relaves liberados.
1985	Huangmeishan, China	Hierro	Infiltraciones de la presa e inestabilidad de taludes	19 personas muertas
22/02/1994	Harmony, Merriespruit, Suráfrica	Oro	Ruptura por rebose después de fuertes lluvias	Los relaves fluyeron 4 km aguas abajo; 17 personas muertas; grandes pérdidas materiales en un municipio residencial. 600,000 m ³ de relaves movilizados.
25/04/1998	Los Frailes, Aznalcóllar, España	Zinc, cobre, plomo, plata	Falla del terreno de cimentación	Miles de hectáreas de cultivos cubiertos de relaves
04/08/2014	Mount Polley, British Columbia, Canada	Cobre, Oro	Falla del terreno de cimentación	Flujo de relaves hacia lagos adyacentes; 7.3 millones de m ³ de relaves movilizados.
05/11/2015	Fundão, Distrito de Mariana, Brasil	Hierro	Falla de la presa sobre su estribo izquierdo. Una capa de relaves finos presente dentro del embalse de relaves gruesos produjo una zona débil a lo largo de la cual inició la falla. Los relaves finos ingresaron indeseadamente al embalse de gruesos a través de un canal tipo vertedero de excesos [24].	Flujo total combinado de 62 millones de m ³ de relaves. La ola de relaves inundó la ciudad de Bento Rodrigues; al menos 17 personas muertas y dos desaparecidas; 158 viviendas destruidas; contaminación del océano Atlántico, del Río Gualaxo y del Río Doce.

Fuente: adaptado de [19]

escorias, colas y otros residuos con posibilidad de estar contaminados con compuestos peligrosos, además de la generación de polvos minerales. La UPME, en su plan nacional para el desarrollo minero tiene como visión general principal para el año 2019: “En ese año la industria minera colombiana será una de las más importantes de Latinoamérica y habrá ampliado significativamente su participación en la economía nacional” [22]. Sin embargo, dentro del plan en general no se detallan políticas ni nuevos procesos de innovación tecnológica para la extracción de minerales y disposición final de relaves, particularmente considerando el incremento de volúmenes de producción.

3.2. Marco normativo

Mediante el Artículo 199 del Código de Minas (Ley 685 de 2001), los Ministerios de Minas & Energía y Medio Ambiente, adoptaron tres Guías Minero Ambientales aplicables a todas las fases del ciclo minero: exploración, explotación, beneficio y transformación de minerales. El numeral 5.4 de la Guía Minero Ambiental No. 2 (explotación) contempla el cierre y abandono de minas y presenta un serie de objetivos, medidas de control y consideraciones para el monitoreo del cierre de operaciones y la contención de colas de proceso (ver Tabla 2).

Dentro de la misma Guía No. 2 se presentan las fichas de manejo para los componentes ambientales afectados y para las actividades específicas de construcción y montaje y obras de trabajo de explotación. Específicamente, para el manejo

de “estériles” la ficha CME 07-15 indica que los estériles generados en la actividad minera y en las excavaciones para infraestructura deben disponerse en sitios especiales, debidamente protegidos de la dispersión y el arrastre y su ubicación debe estar definida desde la planeación [25].

Además, deberán evaluarse las alteraciones que puedan producirse sobre el medio natural, por los cambios en el régimen de escorrentía superficial, la pérdida de suelo, las alteraciones geomorfológicas, la eliminación de hábitats animales, la aceleración y aumento de procesos erosivos y la integración de las estructuras al entorno, una vez se hayan restaurado los terrenos.

Por otra parte, la Guía No. 3 del Código de Minas (Beneficio y Transformación) presenta las fichas de manejo para los componentes ambientales afectados en dichas actividades, susceptibles de generar impacto. El numeral 7.7 establece una ficha particular para el manejo de residuos industriales (BTM 07-07) que especifica que los lodos provenientes de los procesos de separación de minerales serán tratados según los siguientes aspectos [26]: 1) caracterización química y geoquímica de lodos y relaves mediante mineralogía, contaminantes lixiviables, generación de ácidos potenciales, gravedad específica, entre otros; 2) tratamiento de relaves en sitios alejados de cuerpos de agua natural y en estructuras especiales que eviten su infiltración al suelo y a aguas subterráneas; 3) mecanismos de recobro de lodos in situ, en lugar de la extracción seguida del beneficio en superficie, a fin de reducir los impactos ambientales; 4) canalización y uso de materiales impermeables que eviten

Tabla 2.
Aspectos de cierre relacionados con contención de relaves.

Aspectos	Objetivos	Medidas de control	Consideraciones para monitoreo
Estabilidad Física			
Polvo	Estabilizar superficies	Seleccionar el sitio adecuado	Monitoreo visual de zanjas, bermas, etc.
Erosión	Prevenir fallas y deslizamientos	Establecer coberturas (vegetación, escolleras o agua) resistentes a la erosión	Monitoreo de procesos erosivos
Muros o diques de embalses	Controlar material particulado y sedimentos	Diseñar embalses y diques	Monitoreo de vegetación (cobertura vegetal)
Drenaje		Establecer el método de disposición de los relaves (colas) del proceso	Monitoreo de grietas en la corona de taludes, indicios de nuevas fallas, filtraciones o fugas, tuberías, protuberancias en taludes, formación de lodos o fango en la cima
		Recubrir y reforestar	Muestreo de drenajes (sólidos en suspensión).
		Controlar drenaje	Monitoreo y evaluación de tasas críticas de sedimentación, aumento de filtración o aparición de deformaciones internas
		Establecer zanjas, bermas o cercas para controlar accesos de vehículos motorizados	Medición de tasas de descarga y comparación con diseño (flujo)
Estabilidad Química			
Lixiviación de metales pesados	Mantener calidad de agua	Usar materiales químicamente estables para construir muros de diques y embalses	
Drenaje Ácido	Controlar reacciones químicas	Pretratar relaves (colas) del proceso	Muestreo y análisis de drenajes de escorrentía, lixiviados y filtrados de efluentes de las pilas de relaves (colas) de proceso
Reactivos residuales de molienda	Controlar migración y dispersión	Usar coberturas para controlar reacciones químicas	
Estructura de piscinas o diques	Recolectar y tratar residuos	Establecer pantanos o humedales	
		Desviar drenajes	
		Recolectar y tratar efluentes	
Uso del Territorio			
Productividad Impactos visuales	Recuperar el territorio para uso apropiado	Redefinir, cubrir y reforestar Inundar y formar pantanos	Monitoreo e inspección frecuente

Fuente: adaptado de [25]

escapes de los embalses, plataformas y estructuras de tuberías y canales, por las cuales circulará el agua de las colas; 5) minimización del drenaje ácido mediante separación de las colas de sulfuro de alto grado en ambientes de poco oxígeno para minimizar la oxidación; 6) contención hermética de largo plazo (100 a 200 o incluso más años), por la posible gran cantidad de metales pesados; 7) embalses provistos de estructuras de rebose para evitar el desborde por lluvias y/o derrames, y en zonas donde exista actividad sísmica, adopción de medidas de estabilidad; 8) plan de manejo de piscinas de relaves que considere el encapsulamiento de los residuos que generen ácido con materiales que tengan potencial de neutralización, o la adición de álcalis dentro de las colas; 9) destrucción de cianuro para disposición final de aguas y cobertura de los embalses de colas con barreras visuales de vegetación, para prevenir erosión y lixiviación; 10) programas de respuesta inmediata frente riesgos originados en el embalse de relaves, junto con sistema de control y vigilancia durante y después del funcionamiento del embalse; 11) siendo los relaves un pasivo potencial, algunos remanentes químicos pueden aprovecharse nuevos procesos industriales de separación.

A pesar de que en las dos fichas anteriores es claro el enfoque normativo que cubre el manejo y disposición de relaves en Colombia mediante presas y embalses, desafortunadamente no se contemplan tecnologías emergentes de disposición, ya existentes en el mundo.

3.3. Manejo de relaves en proyectos recientes

Actualmente, un número de proyectos mineros de mediana y gran escala en Colombia se encuentran en etapa operativa o de diseño, con proyección de manejo de cantidades significativas de relaves. A continuación se resumen los proyectos más importantes y sus características, con base en información pública.

Proyecto minero La Colosa: es un proyecto minero a cielo abierto, en etapas de estudios y diseños, para la extracción de oro ubicado en Cajamarca (Tolima). En este proyecto se prevé que los residuos se dispongan en un “tanque” de relaves o dique de colas al interior de una cuenca adaptada, cercana al tajo de extracción, contenidos por una presa formada por roca estéril proveniente de la propia extracción [27]. El tanque será impermeabilizado e

implementará monitoreo, supervisión y control permanente, inclusive posterior al cierre del proyecto. El tipo de presa a construir aún no es información de dominio público.

Según la ONG inglesa Colombia Solidarity Campaign, la capacidad del dique de colas que requerirá el proyecto La Colosa será 1420 millones de toneladas y sería uno de los diques de colas más grandes del mundo [28]. El tipo de relaves a disponer en este proyecto será convencional, es decir, sin espesamiento, filtración ni aditivos.

No obstante, aparentemente las características técnicas específicas de esta infraestructura, asociada al proceso, solo se definirán hasta que la compañía (AngloGold Ashanti) culmine el estudio de prefactibilidad y sea aprobado el estudio de impacto ambiental por la autoridad correspondiente.

Las etapas de exploración y de estudios de prefactibilidad vienen caracterizando la geología, hidrogeología, mineralogía, y geoquímica de los materiales y los posibles agentes generadores de drenaje ácido. Para prevenir y controlar la generación de drenajes mineros, el proyecto viene desarrollando un programa llamado AGMP (Advanced Geochemical Management Program), con la participación de laboratorios nacionales e internacionales.

La ejecución y desarrollo del proyecto minero La Colosa se encuentran detenidos después de una consulta popular en el municipio de Cajamarca en marzo de 2017.

Proyecto minero Gramalote: es un proyecto futuro de minería de oro a cielo abierto, denominado de interés nacional y uno de los más grandes de Antioquia [29]. Se estima que este proyecto requerirá la conformación de un depósito de relaves y estériles con una capacidad aproximada de 267 millones de toneladas. La presa de colas estará ubicada en el valle de la quebrada La Palestina y la configuración final de la presa tendrá un área aproximada de 313 Há. La presa contendrá las colas provenientes de la planta de procesos, en un total aproximado de 210 millones de toneladas de relaves producidos durante los 11 años previstos de vida útil de la mina.

Durante la operación normal de la planta, un 96% de las colas se generarán en el circuito de flotación y el 4% restante en los procesos de detoxificación. La gran parte de las colas de flotación se someterán a un proceso de ciclónado para separar la fracción gruesa (“underflow”) de la fracción fina (“overflow”). La primera se utilizará para la construcción de la presa y su contrafuerte de arena, mientras que la segunda será dispuesta en el embalse de colas. La fracción gruesa será depositada mediante tuberías desde la zona de relleno (cresta) de la presa, en donde se extenderá y compactará mecánicamente para formar una estructura densa [29].

La presa de relaves será construida secuencialmente durante la vida de la mina. Inicialmente se construirá una presa de arranque de 40 m de altura sobre una sección angosta del valle de la quebrada La Palestina, para la contención de colas y agua, tal que se pueda iniciar la operación de la planta de procesos. Los materiales de relleno para la presa de arranque serán saprolito y suelo residual, por lo cual no se prevé necesario importar ningún material de relleno para su construcción. Posteriormente, una vez opere la planta de

procesos, a medida que se generen las colas de flotación se incrementará la capacidad de almacenamiento de relaves mediante realces de la presa siguiendo el método de construcción aguas abajo (“downstream”). La longitud total de esta presa será cercana a 1 km.

En el diseño general del depósito se tuvieron en cuenta, entre otras, las siguientes consideraciones: 1) se determinó que el suelo de cimentación de la presa y el basamento rocoso cuentan con baja permeabilidad (10^{-7} a 10^{-9} m/s), por lo cual no se implementará impermeabilización del lecho de la presa de colas; 2) las infiltraciones a través del cuerpo de la presa se manejarán mediante un sistema de recolección y recirculación; 3) el sistema de drenes se contempla únicamente bajo la huella de la presa, a lo largo de drenajes naturales y el fondo de la quebrada Palestina, por lo cual en el área ocupada por los relaves no van a instalarse drenajes; 4) el control, recolección y remoción de la fracción líquida de las colas generadas durante las operaciones, permitirá su reaprovechamiento en el proceso minero; 5) se implementará un plan de instrumentación para monitoreo de la presa y estructuras asociadas; 6) no se importarán materiales de relleno para la presa de arranque ni para la presa principal y contrafuertes.

Proyecto minero Santa Rosa: el proyecto aurífero Santa Rosa (Fig. 2), de 33,000 Há, corresponde a extracción subterránea, y está localizado en el Batolito Antioqueño cerca del municipio de Santa Rosa de Osos, a 70 kilómetros al norte de Medellín. El proyecto pertenece a la multinacional Red Eagle Mining. De acuerdo con el plan de la mina Santa Rosa, se producirán 1,05 millones de toneladas de relaves durante la vida útil de la mina [30]. Se espera que aproximadamente el 40% de esta cantidad se utilice para retrolenado de las obras subterráneas y el resto se dispondrá en un área denominada “Dry Waste Management Facility” (DWMF) al norte del sitio de proyecto.

Este proyecto es el primero en Colombia en producir relaves de tipo filtrado, es decir, con contenido de agua significativamente reducido mediante tecnología de filtro-prensa y chorro de aire. El contenido de agua de las colas es cercano a 16%, lo cual actualmente permite transportarlas en camión hasta el DWMF, el cual corresponde a terraplenes conformados con relleno compactado. La estructura terminada progresivamente se va recubriendo con capa vegetal.

Con respecto a la roca “estéril”, una parte se utiliza para la construcción de la infraestructura interna del proyecto y el mantenimiento de vías. Otra parte se co-dispone con los relaves en el DWMF. En la Fig. 3 se presenta la configuración proyectada inicial y final de DWMF según los estudios de la mina.

Proyecto minero Quinchía-Miraflores: el proyecto Quinchía se localiza en el departamento de Risaralda y comprende dos yacimientos de mineral: Dosquebradas (oro, plata y cobre) y Miraflores (oro). La licencia minera fue adquirida por la empresa Seafield Resources Ltd. [31]. Miraflores se sitúa en la cordillera occidental sobre una topografía montañosa y con drenajes activos. Su evolución geológica es compleja y está asociada a fuerte tectonismo producto del sistema de fallas de Romeral.

Se estima que el proyecto produzca unas 717,000 toneladas de roca estéril producto del desarrollo subterráneo. La cantidad de relleno necesario para retrolleado durante la operación será de 2'726.000 toneladas, por lo que la diferencia se obtendrá localmente a partir de residuos de fosas. Durante el primer año de operación, la mayor parte de la roca estéril se almacenará en superficie; sin embargo, una vez empiece la operación de cierre, los residuos serán dispuestos como material de retrolleado.

La planta concentradora producirá dos tipos de residuos: relaves por flotación y lixiviados de relaves. La fracción más grande (8.7 millones de toneladas ó 95,5%) corresponderá a los relaves por flotación, mientras que la fracción restante (0.42 millones de toneladas) serán lixiviados, los cuales requerirán almacenamiento en embalse separado.



Figura 2. Proyecto minero Santa Rosa
Fuente: [32]

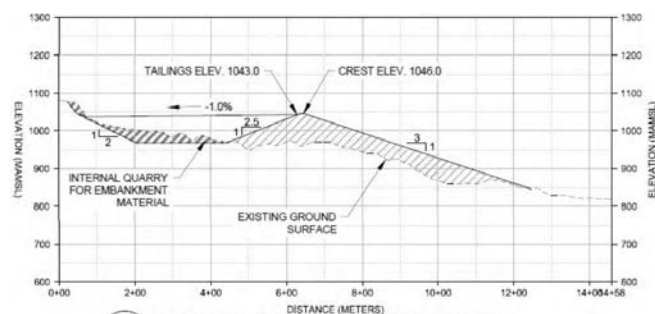


Figura 4. Proyecto minero Quinchía-Miraflores. Perfil de diseño de presa de relaves por flotación,
Fuente: [31]

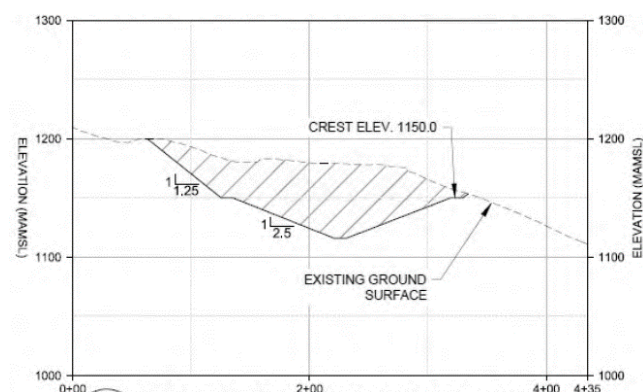


Figura 5. Proyecto minero Quinchía-Miraflores. Perfil de embalse de disposición de lixiviviados de relaves.
Fuente: [31]

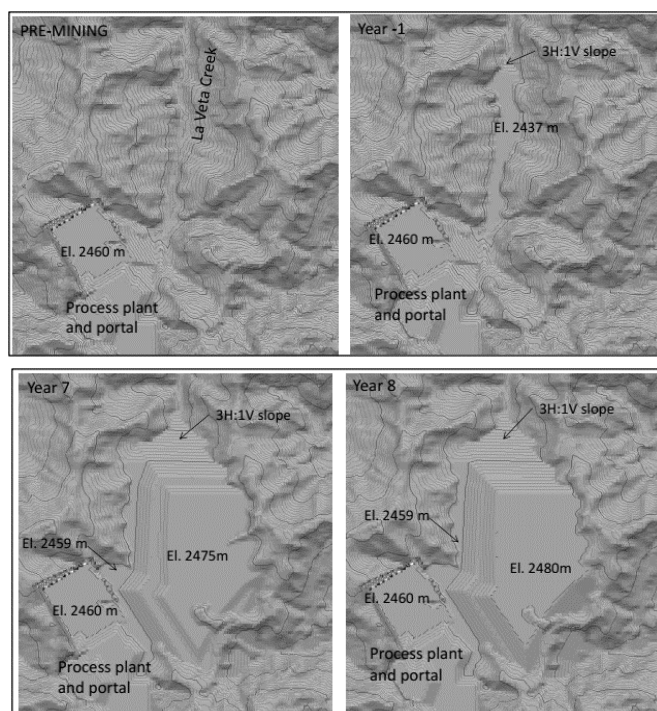


Figura 3. Proyecto minero Santa Rosa. Configuración proyectada del “Dry Waste Management Facility” (DWMF)
Fuente: [30]

En la Fig. 4 se presenta un perfil de la estructura de contención de relaves por flotación, la cuál será construida mediante el método aguas abajo [31]. La construcción iniciará con una presa de arranque conformada en roca estéril de 96 m de altura y alcanzará una altura total de 134 m. La cara aguas arriba implementará un sistema de revestimiento con geomembrana HDPE junto con una capa de arcilla de baja permeabilidad.

Por su parte, la base no se recubrirá ya que, de acuerdo con los estudios geotécnicos del área, se ha identificado una arcilla natural suficientemente impermeable que servirá como barrera.

El diseño propuesto para la estructura de disposición de lixiviviados de relaves se presenta en la Fig. 5. La base del embalse se protegerá completamente con una capa de arcilla compactada de baja permeabilidad y geomembrana HDPE.

Minería informal: La minería informal en Colombia se ha convertido no solo en una preocupación de tipo económico, sino también ambiental, ecológico y social, ya que se desarrolla de manera esencialmente antitécnica, sin vigilancia ni regulación por parte de las entidades gubernamentales.

La minería informal requiere que se adopten las políticas pertinentes para el control de la ilegalidad, como por ejemplo fomentar y apoyar a las asociaciones de mineros artesanales, con el fin de que se puedan mejorar sus prácticas de salud

ocupacional y las técnicas de exploración y explotación conforme a la normativa vigente.

En la minería a pequeña escala, la problemática general es que los niveles de desarrollo tecnológico son muy bajos, inexistentes o deficientes, lo cual no permite aprovechar eficaz ni eficientemente el recurso minero, ni disponer apropiadamente los residuos derivados. Por lo anterior, el Ministerio de Minas creó en el 2007 el proyecto “Mejoramiento de la productividad y competitividad del sector minero colombiano” a través del cual se pretende mejorar la rentabilidad social de la industria minera, basada en técnicas de proyectos mineros de pequeña y mediana escala de producción, mediante una estructura fundamental de asociatividad y fortalecimiento técnico, empresarial, social y ambiental de los grupos asociativos [33]. Dentro de las líneas de enfoque del proyecto se encuentran el desarrollo y productividad minera, que tiene como objetivo “impulsar y financiar proyectos mineros sostenibles para mejorar las condiciones técnicas, económicas y sociales de la actividad minera a pequeña escala”.

Por lo tanto, la formalización de la actividad minera en Colombia no hace referencia únicamente a la obtención de un permiso o título para exploración y explotación, sino también a la definición de estructuras empresariales y asociativas, de tal forma que a las mismas incluso se le facilite el acceso a créditos para introducir tecnologías con estándares internacionales y buenas prácticas [33].

4. Tecnologías emergentes para manejo de relaves

La búsqueda de métodos alternativos de disposición y aprovechamiento de relaves está relacionada con la falta de espacio disponible para contenerlos de manera tradicional, con la resistencia natural de la ciudadanía a vivir cerca de estructuras tipo presa, siendo estas últimas las más comunes, y con la necesidad de mejorar la recuperación de agua y la disminución del impacto ambiental.

En este sentido, recientemente se vienen desarrollando tecnologías alternativas, principalmente: espesamiento y/o filtrado de relaves, retrolenado de minas con pasta de relaves, realces de estructuras ya existentes, y disposición formal submarina [4]. A continuación se resumen las principales características técnicas de estas tecnologías emergentes.

4.1. Espesamiento y/o filtrado de relaves

En 1975 el ingeniero canadiense Eli I. Robinsky, para la mina Kidd Creek en Canadá, desarrolló el concepto de un sistema de disposición de relaves que no requiere dique, presa u otra estructura para su contención. El sistema aprovecha la mayor viscosidad que muestra la pulpa del relave si se aumenta intencionalmente su concentración de sólidos. Robinsky propuso una curva para relacionar la pendiente en reposo del relave en función del contenido de sólidos de la pulpa. Dicha curva mostró que, para concentraciones del orden de 53% en peso, la pendiente en reposo es 2%, mientras que para concentraciones del 65%, la

pendiente aumenta hasta 6% [6]. Se concluyó que pueden disponerse los relaves en forma de un “cono” vertido desde un punto de descarga central, y la pendiente del cono corresponde a su respectiva concentración de sólidos.

El espesado de relaves se logra con ayuda de estructuras tipo tanque denominadas “espesadores” cuya función principal es separar la fase agua de la fase de relaves saturados bajo el principio de sedimentación por gravedad, tal que los sólidos viajan hacia el fondo y el agua queda arriba. Un espesador normalmente es metálico y comprende un tanque de acero al carbón, que generalmente tiene forma de embudo, y cuya profundidad varía dependiendo de la cantidad de líquidos que se desee recuperar (Fig. 6). Dentro de los componentes de los espesadores se encuentran agitadores y rastras, un eje principal, motor, un puente de metal para el mantenimiento y ubicación de los sistemas electromecánicos y una caja reductora [34]. Así mismo, los espesadores cuentan con instrumentos que indican el torque, ya que a medida que se van sedimentando los sólidos el torque va aumentando. Dicho torque se mide y controla mediante instrumentos que se levantan cuando el espesador está sobrecargado. Las rastras tienen aletas que realizan el trabajo de arrastrar los sólidos hacia el centro.

Si el objetivo de disposición es, por ejemplo, depositar relaves sobre un valle plano desde la ladera que limita dicho valle, se puede iniciar el vertido de los relaves espesados desde pequeña altura, en un punto central del valle, con una pulpa relativamente diluida. Posteriormente, se puede elevar el punto de descarga simultáneamente con el aumento en la concentración a fin de disponer las capas siguientes.

La operación anterior suele denominarse de “descarga central espesada” (CTD). El punto de descarga puede desplazarse lateralmente con el objeto de formar un depósito de base ovoidal (ver Fig. 7).

Aunque el concepto se desarrolló en 1975, no fue sino hasta mediados de los años 1990 cuando se implementó formalmente la tecnología. A pesar de que este tipo de depósito no requiere la construcción de un dique para limitar el área comprometida, sí se recomienda la construcción de un terraplén relativamente bajo, alejado del borde exterior del depósito, con el fin de contener el agua liberada por los relaves, la cual eventualmente puede captarse, bombearse y recircularse.

En particular, la industria de la alúmina fue la que lideró la transición industrial hacia relaves espesados. A mediados los años 1980, esta industria se fijó una meta de convertir los almacenamientos existentes de relaves en almacenamientos “secos” para lograr beneficios ambientales. Lo anterior fue posible en un período relativamente corto gracias a la nueva generación de espesadores disponible. Así, hoy día la manera de operar en la industria de alúmina mundial involucra relaves espesados a una alta concentración de sólidos antes de la descarga.

En cuanto a la industria minera en general, no fue sino hasta la primera década del siglo XXI que la tecnología de espesamiento avanzó hasta hacer factible el concepto de disposición superficial con alta densidad.

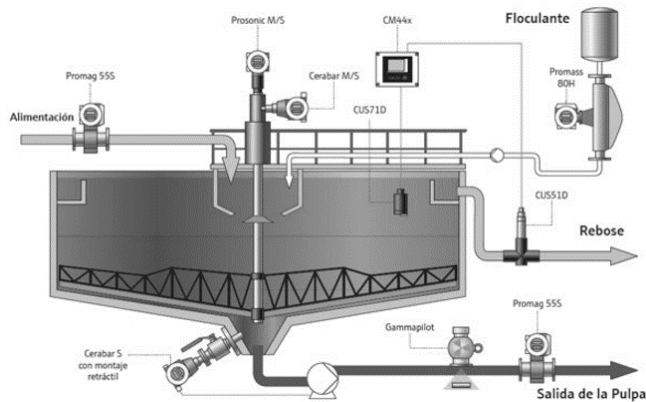


Figura 6. Sección transversal de un espesador convencional
Fuente: [34]

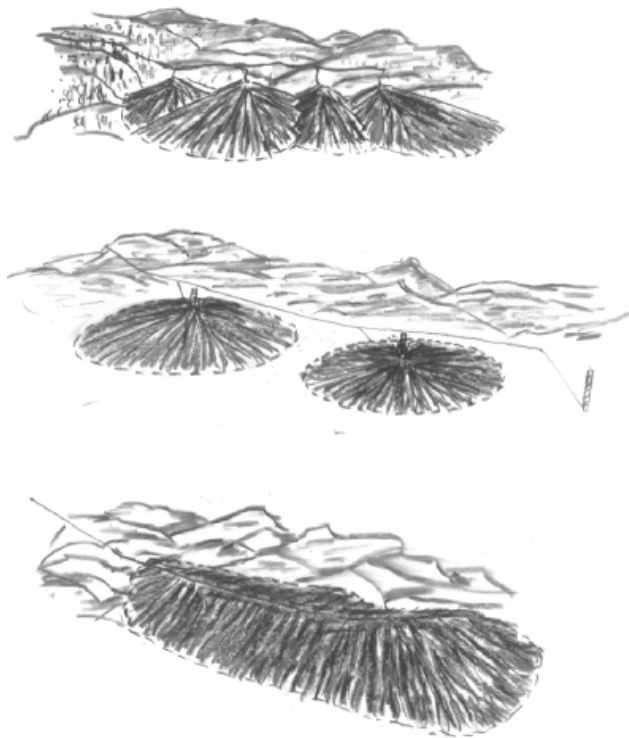


Figura 7. Disposición de relaves espesados, método Robinsky.
Fuente: [6]

Por otra parte, los relaves filtrados guardan similitudes con los relaves espesados, con la diferencia de que el material contiene aún menos agua debido a un proceso similar al que se emplea para filtrar lodos concentrados, específicamente con filtros-prensa, vacío [6] o chorro de aire a presión. En ocasiones, a la disposición de relaves filtrados se le denomina de "apilamiento en seco".

Los relaves filtrados son primero espesados antes del proceso de filtrado, de manera que se obtenga el contenido de agua adecuado para su disposición final, la cual normalmente es mediante conformación de rellenos

compactados. Sin embargo, la pluviosidad y evaporación del sitio, el tiempo y área de desecación y la flexibilidad operacional pueden limitar la aplicación del filtrado de relaves [35].

En Latinoamérica, los primeros intentos de implementar y disponer relaves filtrados tuvieron lugar en operaciones de bajo rendimiento en regiones como el desierto de Atacama en Chile, donde la retención de agua es de gran importancia. En Colombia, el primer proyecto que los implementó fue Santa Rosa en Antioquia (ver Numeral 3.3).

4.2. Retrolenado de minas

Una "pasta de relaves" es una mezcla densa y viscosa de relaves y agua, que a diferencia de las suspensiones, no se segrega en reposo [36]. La pasta tiene consistencia de trabajo similar a la del concreto húmedo, y de hecho varias de las técnicas de caracterización geotécnica de pastas tienen su origen en la industria del concreto. La mayor ventaja de las pastas de relaves es que pueden transportarse eficientemente en tuberías sin los problemas de segregación o sedimentación que ocurren normalmente en las pulpas de relaves. Además, una vez depositados, los relaves se dejan secar y luego acopiar, minimizando así la huella del sitio de disposición [6]. La tecnología de pasta se originó en la industria de la minería de metales hace más de 30 años.

La aplicación de un aditivo espesante o cementante para la fabricación de pasta y relaves espesados es relativamente nueva [37], pero las operaciones de este tipo de relaves están popularizándose rápidamente. Más aún, el uso de agentes espesantes o cementantes para producir pasta con el fin de retrolenar minas tiene un potencial atractivo como alternativa a la disposición convencional. Particularmente, la tecnología para disponer relaves como relleno cementado en obras subterráneas está en pleno desarrollo en la actualidad [38].

El retrolenado de minas es por lo tanto un proceso mediante el cual los residuos mineros, combinados con pequeñas cantidades de cemento y/o roca estéril, se disponen hidráulicamente al interior de galerías ("stopes") con el fin de estabilizar el macizo rocoso, permitir la extracción completa del mineral adyacente y reducir la huella de disposición de residuos en superficie. Para facilitar el transporte de la pasta al interior de las galerías, el retrolenado típicamente implica usar grandes volúmenes de agua para mantener la pasta con consistencia fluida. Adicionalmente, el proceso de retrolenado normalmente requiere la construcción de barricadas estructurales ("mamparos") para bloquear el túnel de acceso a base de la galería ("stope drawpoint"; Fig. 8). De esta manera, el diseño de la disposición por retrolenado de pasta requiere calcular los esfuerzos que soportará la barricada durante y después del llenado [39].

Susceptibilidad química de pastas cementadas: Benzaazoua et al. (2002) muestran que las propiedades mecánicas y reológicas de la pasta cementada de relaves para retrolenado dependen de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los relaves de la mina, los tipos de aditivos y sus proporciones [40].

También se conoce que algunos residuos mineros pueden generar drenaje ácido o alcalino en presencia de agua y oxígeno, por lo cual la presencia de sulfuros dentro de la pasta cementada, así como los sulfatos solubles, tiene efectos perjudiciales sobre la resistencia del relleno de pasta debido a ataque con ácido sulfúrico [41]. Estas alteraciones químicas no se limitan a un efecto de oxidación de la superficie y pueden progresar a lo largo de toda la masa de relleno. Específicamente, en análisis de núcleos extraídos de pastas curadas, se han evidenciado fracturas acompañadas de trazas de oxidación, típicas de desgaste químico [41]. Adicionalmente, la presencia de sulfuros en los relaves causa disolución de las fases cálcicas de los hidratos de cemento, deteriorando la pasta cementada. Por lo tanto, el desafío para asegurar la viabilidad y operatividad segura de la tecnología de pasta cementada es que el relleno sea capaz de estabilizar galerías subterráneas sin perder resistencia a largo plazo por alteración química [40].

La Fig. 9 muestra los componentes principales que afectan la calidad, trabajabilidad y curado de una pasta de relaves para relleno: composición química del cementante y los relaves, granulometría, densidad y contenido de sólidos y química del agua de mezcla.

Benzaazoua et al., 2002 utilizaron seis tipos de cementantes para producir diferentes mezclas de pasta de relleno con cuatro diferentes relaves sulfurados provenientes de minas canadienses [40]. Posteriormente, sometieron cada mezcla a ensayos de compresión simple. Estos autores encontraron que el contenido de sulfato del agua de mezcla afecta el proceso de hidratación, dependiendo del tipo de cementante y el tiempo de curado.

Además, se demostró que la química del cementante combinada con la química del agua de mezcla afectan la formación de hidratos primarios y secundarios durante el fraguado de la pasta.

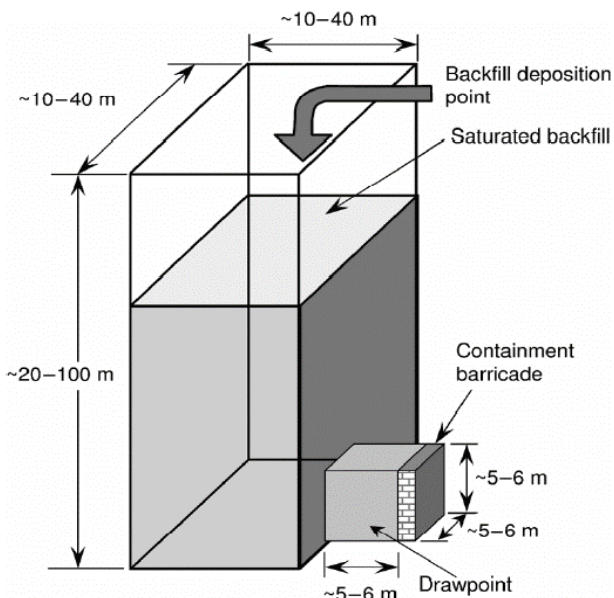


Figura 8. Configuración típica del stope y drawpoint
Fuente: [39]

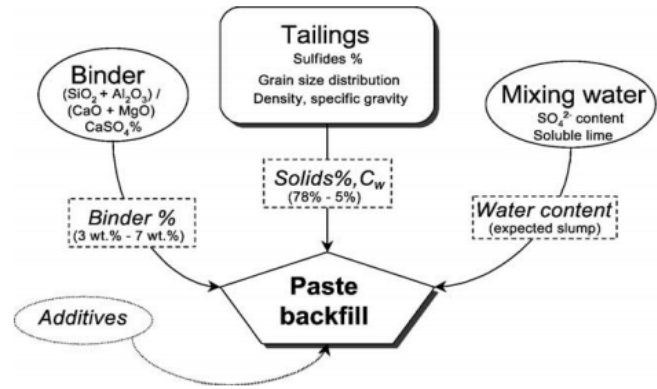


Figura 9. Componentes de una pasta cementada para retroleno de minas.
Fuente: [39]

En efecto, la calidad de la matriz de la pasta es función directa de la naturaleza de los hidratos precipitados. Este estudio resalta la complejidad de los materiales de pasta de relleno para la cual el aumento en resistencia depende de la calidad de sus tres principales componentes: relaves, cementante y agua de mezcla.

Comportamiento mecánico de pastas cementadas: Actualmente no existe una solución definitiva a los problemas de distribución de esfuerzos totales y cálculo de esfuerzos sobre una barricada estructural para contención de pasta cementada [39]. En pastas de relaves finos, la tasa de aumento de esfuerzo sobre la barricada depende de la tasa de llenado, la tasa de consolidación del material y la tasa de hidratación del cemento. La viscosidad, densidad y contenido de sólidos de la pasta también son factores determinantes en el uso de este relleno.

Por lo tanto, el tema aún constituye un riesgo significativo para la seguridad de operaciones mineras. Este riesgo se ha materializado a través de fallas de barricada reportadas recientes, por ejemplo entre Diciembre de 2003 y Diciembre de 2004 cuando hubo al menos siete fallas en todo el mundo, y en 2006 cuando hubo al menos cinco [42]. Estos reportes no dan detalles específicos de la falla ni nombre de las minas, pero sí mencionan que las fallas ocurrieron en operaciones de dos minas diferentes en Australia y que no causaron pérdidas humanas.

Los esfuerzos totales sobre la barricada durante el retroleno están influenciados por la interacción entre el relleno y las paredes de la galería. Rankine (2004) presenta análisis de esfuerzos sobre la barricada teniendo en cuenta los cambios graduales en resistencia y rigidez del material debido a la hidratación del cemento, demostrando que el acople adecuado típico de hidratación de cemento con tasas de llenado influye en la distribución de los esfuerzos resultantes [43].

Por otra parte, mediante simulaciones con elementos finitos [44] es posible examinar los factores que influyen en el "arqueado" de rellenos cementados, tanto para un escenario de vertido instantáneo como considerando el proceso de llenado. Estos autores muestran que el comportamiento de una galería es complejo, destacando que, si la tasa de llenado

es muy alta en relación con la tasa de consolidación de la pasta, no se produce arqueamiento, y el esfuerzo vertical es igual al esfuerzo total por peso propio. Por otra parte, en ausencia de consolidación, la tensión total horizontal es igual a la tensión total vertical, lo cual tiene implicaciones serias para las cargas de barricada. Los autores también hacen hincapié en la necesidad de acoplar el proceso de hidratación del cemento en modelos del proceso de relleno con relaves cementados.

Helinski et al. (2010) presentan un modelo constitutivo para describir el comportamiento de la pasta cementada, acoplado los procesos de consolidación e hidratación del cemento [39]. Para este fin, consideran el proceso de “auto-deseccación” de la pasta, entendido como la reducción de presión de agua intersticial en el material de relleno debido a la pérdida neta de volumen de agua en el proceso de hidratación. Sin embargo, estos autores indican que la tarea de determinar la tasa a la cual el agua se consume es muy compleja y se hace especialmente difícil de cuantificar debido a que en la hidratación del cemento participan al menos ocho reacciones químicas diferentes, cada una consumiendo cantidades diferentes de agua y a su vez cada una generando un volumen de hidrato de reacción diferente. Además, cada reacción comienza a una tasa e instante diferente y normalmente no todo el contenido total de cemento en la mezcla puede reaccionar.

Lo anterior demuestra que la eventual adopción de la tecnología de pasta cementada de relaves en un proyecto minero es una decisión que implica una caracterización avanzada y rigurosa del relave, el agua de mezcla y el cemento a utilizar, al igual que el análisis de la durabilidad de la pasta, su comportamiento e interacción mecánico-química con las galerías a retrollevar.

4.3. Realce de estructuras existentes (“piggy-backing”)

La disposición mediante realce de estructuras existentes, o incluso clausuradas, para contención y manejo de relaves (“piggy-backing”) es una técnica orientada a aumentar la capacidad de retención de relaves de dichas estructuras, en lo posible sin aumentar su huella en planta. Por lo tanto, consiste en ampliar las estructuras existentes principalmente hacia “arriba” en lugar de hacia “afuera” [45]. Esta estrategia de disposición se justifica normalmente en la extensa huella que ocupan las estructuras ya existentes y en la dificultad cada vez mayor de obtener licencia para la construcción de nuevas áreas de disposición. De las técnicas comunes de construcción de presas de relaves, aguas arriba, aguas abajo y línea central [46,47], los realces normalmente implementan el método aguas arriba. Este método consiste en elevar paulatinamente la presa mediante construcción de bermas bajas encima y detrás del dique del nivel existente (Fig. 10). A diferencia del método aguas arriba, el método aguas abajo consiste en vaciar y reconformar la fracción tamaño arena del relave, generalmente ciclada, sobre el talud aguas abajo del muro, mientras que el relave fino (“lamas”) se deposita hacia aguas arriba. Necesariamente, el método aguas abajo aumenta gradualmente la huella de la estructura. Finalmente, el método de línea central busca depositar la fracción arena hacia el costado aguas abajo y los finos hacia el lado aguas arriba, tal que la nueva cresta siga el mismo eje de la presa de arranque original.

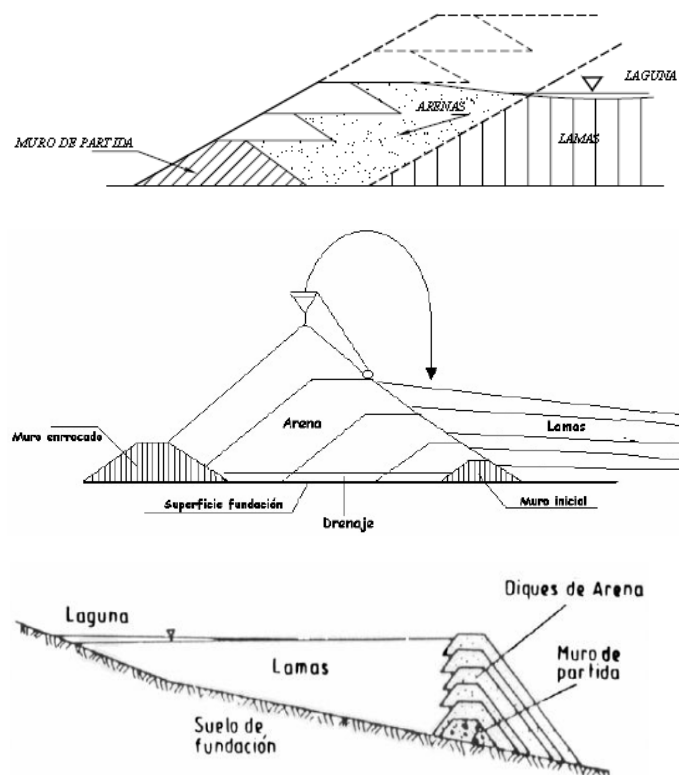


Figura 10 Métodos constructivos de presas de relaves: aguas arriba, aguas abajo, línea central. Fuente: [6]

Independientemente de la técnica de construcción del realce, el objetivo es desarrollar en la estructura un “anillo exterior” estable y consolidado para contener el material saturado interior. Para mejorar la estabilidad del dique/anillo exterior, normalmente se implementan filtros de desagüe alrededor del perímetro los cuales controlan el nivel de agua infiltrada a través del dique perimetral.

La técnica de realce presenta múltiples retos que dificultan su implementación y aplicación. Primero, esta práctica no está legalmente permitida en países mineros ubicados en zonas sísmicas, como Chile, especialmente después del terremoto de El Cobre de 1965. Por otra parte, algunas estructuras de relaves clausuradas pueden simplemente carecer de obras de drenaje subsuperficial a nivel cimentación, o dichos drenajes pueden localizarse a un nivel más alto que el nivel original del terreno, lo cual los vuelve inoperantes.

Todo realce requiere obras de drenaje para mantener el nivel freático bajo la presa, facilitando así su consolidación y mejorando la estabilidad de sus taludes [45], particularmente teniendo en cuenta la posible incertidumbre en el comportamiento de la presa existente a realzar. Las obras de drenaje típicamente se construyen usando arena limpia, grava uniforme, tubería perforada y geotextil. El transporte de este material a la parte superior de una presa existente a realzar puede además ser dispendioso y costoso, y puede incluso

causar retrasos en las operaciones normales de las instalaciones.

4.4. Disposición submarina

La disposición submarina de relaves consiste en verter los residuos de las minas en el mar por medio de una tubería sumergida, también denominada “emisario submarino”. La minería tiene larga historia de vertimiento de residuos en el mar, siendo los métodos más rudimentarios los de eliminación “superficial” que implican el vertido directo de residuos en un entorno cercano a la costa.

La práctica de disposición submarina se justifica frecuentemente en las siguientes causas [10,48]:

- Actividad sísmica: en zonas de alta actividad sísmica, la integridad de las estructuras tradicionales de contención de relaves no está garantizada, con riesgo de vertimiento súbito y catastrófico de relaves.
- Escasez de terreno: la construcción de un depósito tradicional de relaves normalmente requiere gran cantidad de terreno disponible, a menudo un área mayor que la huella de la propia mina.
- Drenaje ácido: dado que una de las causas del drenaje ácido de rocas y relaves es la exposición de minerales de sulfuro ante el oxígeno [9], la eliminación de la fuente de oxígeno debería ser eficaz para retrasar o eliminar el drenaje ácido. Por lo tanto, se argumenta que la disposición de relaves bajo el mar, en ambiente anóxico, es efectiva para estabilizar geoquímicamente los sulfuros, y eliminar o mitigar el drenaje ácido. La Fig. 11 presenta un modelo esquemático de un yacimiento mineral con sulfuros, indicando las zonas donde sulfuros, óxidos y sulfatos/cloruros dominan la asociación mineral. Esta zonificación sin embargo es solo una simplificación de los diferentes grupos minerales que pueden coexistir. A la izquierda se resalta la zona en donde se supone que se pueden disponer los relaves (mar profundo en condiciones redox de tipo reductoras) y su régimen geoquímico dominante.
- Estética: se argumenta que los impactos estéticos de las estructuras convencionales de manejo de relaves se evitan en gran medida a través de la disposición submarina. En particular, se evita ocupar grandes extensiones de terreno, el proceso no da lugar a paisajes elevados artificialmente, y ni el polvo ni los olores afectan las comunidades cercanas al proyecto.

En particular, en regiones del Pacífico Occidental, varias empresas mineras afirman que la disposición submarina de relaves (“submarine tailings disposal”, STD) es la solución óptima para manejo de estos residuos.

Estas empresas argumentan que, en dicha región del mundo, la contención de residuos sobre tierra firme es muy arriesgada dadas las experiencias de sismos y la alta precipitación de la zona. Adicionalmente, las islas montañosas carecen de espacio para el almacenamiento de relaves, y son regiones donde el terreno se requiere con urgencia para actividades agrícolas.

A pesar de los anteriores argumentos, científicamente se sabe relativamente poco sobre el medio ambiente subacuático (especialmente el profundo) y los procesos ecológicos que

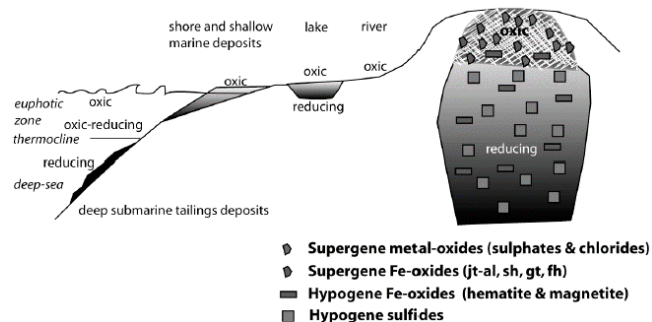


Figura 11. Modelo esquemático de un yacimiento mineral con sulfuros y área de posible disposición submarina.

Fuente: [10]

tienen lugar a tales profundidades. Además, existe amplia evidencia de las desventajas y riesgos de la disposición submarina de relaves [10], principalmente:

- Asfixia de organismos benthicos y alteración física y química del hábitat del fondo marino
- Reducción del número de especies y biodiversidad de las comunidades marinas
- Riesgo de liberación de compuestos tóxicos de los residuos al agua de mar
- Bio-acumulación de metales pesados a lo largo de la cadena alimenticia, y en última instancia hasta llegar al pescado para el consumo humano
- Huella de mayor amplitud en el fondo del mar que en tierra firme
- Movilidad de los residuos a diversas regiones de los ecosistemas marinos debido a surgencia y corrientes submarinas

Por otra parte, se conoce que en las tuberías de transporte de relaves se producen fugas, tanto en tierra firme como en el mar, ya que los residuos son muy abrasivos [49]. Este problema no es exclusivo de tuberías antiguas, sino también de las recientes. En el mar, los emisarios además son vulnerables a deslizamientos de tierra, tormentas y tsunamis. La ruptura de un tubo de transporte submarino de relaves tiene graves impactos en zonas poco profundas y ricas en arrecifes de coral.

A pesar de lo anterior, el vertido submarino de relaves a poca profundidad ha ocurrido recientemente con consecuencias serias, como los casos de la mina Placer Dome’s Marcopper en Filipinas (1975-1991), la mina Newmont’s Minahasa Raya en Indonesia (iniciado en 1996) y la mina Misima en Papua-Nueva Guinea (1988-1993) en la cual unos 50 millones de toneladas se vertieron sobre un arrecife de coral cercano a la costa [49].

Desde la década de 1970, se han implementado sistemas de disposición submarina de relaves que los depositan a profundidades intermedias, como las minas Copper Island en Canadá y Atlas en Filipinas. Estos sistemas también han causado impactos sobre el medio ambiente debido a que los

relaves no se localizaron de acuerdo con las predicciones de los consultores, sino que incluso lograron volver a la superficie a causa de corrientes marinas.

Por otra parte, ha habido esfuerzos para desarrollar sistemas de disposición más “sofisticada” de relaves en profundidad con el objeto de depositarlos a profundidades suficientes para evitar la mezcla con la columna superficial de agua [48]. Para este fin, típicamente se procesan los relaves en una suspensión de aireada que posteriormente se canaliza hacia sitio de disposición. Adicionalmente, se suelen usar compuestos químicos para flocular las partículas de relave, evitando la flotación y mezcla con agua de mar, para así aumentar la densidad del material y la tasa de consolidación en el lugar escogido para depositación.

El Protocolo de Londres sobre prevención de la contaminación marina por disposición de residuos es el principal instrumento internacional para la protección de los océanos de la contaminación antropogénica. Actualmente, 42 países han ratificado el Protocolo de Londres, incluyendo países de amplia tradición minera, tales como Australia, Canadá, China y Suecia. Sin embargo, países como Nueva Guinea y Estados Unidos no han firmado el convenio, aunque Estados Unidos en 1991 creó la norma de calidad de agua conocida como “Clean Water Act” [10], la cual especifica una política de “cero vertimientos” hacia las aguas marinas, es decir, no es aceptable ningún tipo de disposición de residuos de mina en el medio marino. Lo anterior efectivamente ha prohibido las prácticas de disposición submarina de relaves en EEUU.

Por su parte, en Australia el vertimiento de residuos en el mar está regulado por la Ley de Protección del Medio Ambiente (1981) y sus normas asociadas. Esta ley prohíbe la disposición de residuos considerados demasiado perjudiciales para el medio ambiente marino y regula la disposición de algunos residuos permitidos, de menor impacto. Australia es también signatario del Protocolo de Londres. Sin embargo, se puede argumentar que en Australia no existe una prohibición explícita de la disposición submarina de relaves. Adicionalmente, el Manual del Gobierno de Australia sobre gestión de residuos indica que, a pesar de que la disposición submarina de relaves no es explícitamente ilegal en Australia, cualquier proyecto encaminado a implementar este método estará sujeto un escrutinio robusto y a un proceso de aprobación muy complejo [48].

En Canadá, el Reglamento de Efluentes explícitamente prohíbe el vertido de residuos en medio marino. Previo a estas regulaciones, emitidas en 2002, la eliminación de relaves bajo el mar era legalmente posible.

Finalmente, el documento guía de la Comisión Europea de Mejores Técnicas Disponibles [50], orientado hacia la gestión de relaves y roca estéril provenientes de actividades mineras, establece que la disposición submarina de relaves puede ser un método aceptable de gestión de residuos cuando hay potencial de generación de drenaje ácido de relaves y roca.

De acuerdo con las reglamentaciones y políticas mundiales en cuanto a la regulación de disposición

submarina de relaves, es clara la posición mayoritaria de no permitir la disposición de relaves en medio marino. Sin embargo, aún se posiciona como una oportunidad investigativa para entender tanto los efectos sobre la ecología de mar profundo como para revisar el tema de drenaje ácido.

5. Oportunidades en Colombia

Aunque Colombia es un país de amplia historia y tradición minera, no es un país de grandes estructuras de disposición y manejo de relaves o colas ni roca “estéril”. Sin embargo, Colombia no puede ser ajena a la problemática de la disposición moderna de los relaves o colas, la cual presenta desafíos significativos porque, aunque el país muestra una economía en crecimiento, las innovaciones tecnológicas son escasas y el recurso humano especializado para el manejo de estos residuos es limitado. Por lo tanto, los nuevos proyectos de minería a gran escala en el país (ver Numeral 3.3) requieren no solamente importar y adaptar la experiencia de especialistas extranjeros sino, de manera imperativa y urgente, desarrollar localmente el capital humano de ingeniería que conciba, diseñe, construya, opere, mantenga y cierre estas estructuras. En este sentido, el conocimiento necesario no solamente incluye los temas técnicos de disposición y estabilidad, sino la sostenibilidad ambiental y social de estos proyectos.

En cuanto a las tecnologías emergentes para el manejo de relaves, con ellas se busca minimizar el pasivo que dejan las estructuras convencionales de disposición, mediante la reducción del área superficial, en el ánimo de impulsar la viabilidad de un proyecto minero. Las condiciones topográficas de las principales zonas mineras de Colombia permiten una amplia gama de condiciones, desde valles y llanuras hasta zonas de alta montaña, normalmente complejas. Por lo tanto, siempre que las condiciones lo permitan, es fundamental orientar la disposición de relaves hacia conseguir la mínima huella posible. De esta manera, el espesamiento y/o filtrado controlado de relaves constituyen métodos efectivos de disposición, particularmente para zonas montañosas donde el espacio disponible para proyectar estructuras de contención es muy escaso.

En este sentido, la disposición al interior de los mismos espacios resultantes de la actividad extractiva también adquiere un significado muy importante, tanto en minería a cielo abierto como subterránea. Los relaves, durante o después de su producción, deberían entonces retornarse a los propios pits o galerías subterráneas, siempre y cuando se garantice su estabilidad y que no se degraden las condiciones hidrogeológicas locales. Así, las tecnologías de retrolleado con pasta de relaves surgen como prácticas deseables para la restauración del entorno. Igualmente, estas técnicas permitirían la gestión de los residuos sólidos mineros con la posibilidad adicional de rehabilitar las áreas restauradas con bosques, actividades recreativas y eventualmente agricultura. Por supuesto, el principal reto consiste en garantizar la estabilidad geotécnica y química del relleno, por ejemplo en términos de seguridad operativa de los trabajadores y posible drenaje ácido.

Otra posible alternativa para el manejo de pits mineros clausurados, que no se encuentren muy alejados de áreas urbanas (como es el caso de algunas minas de oro en Antioquia cercanas a Medellín, o minas de agregados pétreos cercanas a Bogotá), es su reaprovechamiento como sitio de disposición de residuos sólidos urbanos. Por supuesto, los retos principales de esta alternativa incluyen la impermeabilización y estabilidad geotécnica del terreno de cimentación y el manejo de lixiviados provenientes de los residuos. Igualmente, se puede estudiar la viabilidad de reaprovechar benéficamente los residuos mineros para la infraestructura de la propia mina o, en proyectos cercanos a centros urbanos, como material de construcción tipo relleno. El impacto de estas alternativas se puede medir tanto en términos económicos como de sostenibilidad ambiental.

En cuanto a la disposición de relaves en medio submarino, la información disponible para Colombia es prácticamente inexistente, aunque es claro que históricamente numerosas malas prácticas mineras han dejado huella en múltiples cuerpos de agua. Dado que Colombia no es un país tecnológicamente avanzado en este tema, es fundamental desarrollar políticas y/o unirse a protocolos internacionales de tal forma que se impida el vertimiento de los residuos mineros al océano, al menos hasta que la evidencia científica no aclare los impactos que esta práctica puede tener sobre el lecho marino.

En general, el planteamiento de políticas públicas e institucionales debería enfocarse a estrategias para buscar desarrollo e investigaciones alrededor de las diferentes tecnologías de disposición, tanto tradicionales como emergentes. Específicamente, se requieren planes de mediano y largo plazo con acciones objetivas para atacar los grandes retos que impone la disposición de relaves para el país desde las perspectivas ambientales, económicas, sociales y tecnológicas.

Por ejemplo, los contratos con multinacionales mineras podrían incluir cláusulas que exijan productos de desarrollo tecnológico para disposición de relaves y transferencia de conocimiento, y acordar estrategias para que la industria nacional pueda igualmente suplir estos requerimientos. Si bien en el país las empresas multinacionales están incorporando nuevas tecnologías para la disposición de relaves, las entidades gubernamentales y de control encargadas no necesariamente están al día con respecto a dichos avances técnicos. Más aún, la ausencia de políticas claras y exigencias específicas para el manejo de los residuos limita el control responsable de estos procesos.

Finalmente, la producción minera actual en Colombia tiene la necesidad de investigar sobre modelación de depósitos minerales, geomecánica de macizos rocosos ante la presencia de excavaciones múltiples o rellenos (en condiciones subterráneas o a cielo abierto), simulación y modelación de explotaciones asociadas al planeamiento minero y el amplio tema del cierre de minas. Con respecto a la exploración, se tiene evidencia de que la falta de modelos geológicos apropiados no permite estimar de manera global el nivel de reservas mineras del país, los potenciales minerales por explotar y la planeación estratégica minera por

parte de los organismos de gobierno [51]. Lo anterior redundaría en el atraso en cuanto a políticas de explotación minera de minerales de alto valor agregado y capaces de intervenir en cadenas productivas.

6. Conclusiones

Colombia es un país de tradición minera, pero no cuenta con amplia experiencia en el diseño y gestión de grandes estructuras de disposición de relaves ni roca estéril, tanto desde el punto de vista técnico como normativo. Adicionalmente, los avances tecnológicos en este campo son escasos y el recurso humano especializado para el manejo de estos residuos es limitado. Más aún, la gran problemática socio-ambiental asociada con minería informal es extremadamente preocupante.

Actualmente, un número de proyectos mineros de mediana y gran escala en Colombia se encuentran en etapa de diseño u operativa, con proyección de manejo de cantidades significativas de relaves. Para estos proyectos, el país ha generado guías minero ambientales aplicables a todas las fases del ciclo minero. Sin embargo, dado que las presas convencionales de contención de relaves tienen estadísticamente 100 veces más probabilidad de falla que las presas de contención de agua, existe gran preocupación por el desempeño de posibles grandes estructuras de disposición de relaves en el futuro.

Las tecnologías emergentes mundiales para el manejo de relaves buscan minimizar la huella que dejan las estructuras convencionales de disposición, especialmente mediante la reducción del área superficial. Entre dichas tecnologías resaltan el espesamiento y/o filtrado de relaves, el retrolleado de minas con pasta de relaves, el realce de estructuras ya existentes, y la disposición submarina.

Las principales oportunidades en Colombia para la adopción de tecnologías modernas de disposición final comprenden que el espesamiento, filtrado y/o retrolleado controlado de relaves minimizarían la huella minera en zonas montañosas, en donde se encuentran la mayoría de títulos mineros del país. Sin embargo, el principal reto para la implementación del retrolleado consiste en garantizar la estabilidad geotécnica y química del propio relleno. En todo caso, la validación de toda tecnología requiere instrumentación robusta y monitoreo juicioso, tanto geotécnico como de calidad del agua.

Se concluye también que el caso particular del vertimiento de residuos mineros al océano debe evitarse, al menos hasta que la evidencia científica no aclare los impactos que esta práctica tiene sobre los diferentes niveles del lecho marino. Científicamente se sabe relativamente poco sobre el medio ambiente subacuático, especialmente el profundo, y los procesos ecológicos que tienen lugar a tales profundidades. Además, normalmente los relaves no se localizan de acuerdo con las predicciones de los consultores, sino que incluso logran volver a la superficie a causa de corrientes marinas. El Protocolo de Londres sobre prevención de la contaminación marina por disposición de residuos, ratificado por 42 países, y el “Clean Water Act” en

Estados Unidos constituyen marcos de referencia internacionales que Colombia debería considerar acatar y suscribir.

Como principal limitación para implementar tecnologías emergentes en Colombia, se tiene que el país requiere desarrollar en el corto plazo el capital humano de ingeniería con las competencias para abordar el manejo moderno masivo de residuos mineros, con visión tanto de disposición y estabilidad como de sostenibilidad ambiental y social. En este sentido, el planteamiento de políticas públicas e institucionales debería enfocarse a estrategias para buscar desarrollo, investigación e innovaciones alrededor de las diferentes tecnologías de disposición, tanto tradicionales como emergentes.

Agradecimientos

Los autores agradecen las valiosas discusiones con el Profesor Andy Fourie de University of Western Australia, que permitieron enriquecer este artículo. Igualmente, agradecen al Geólogo John A. Sánchez por sus comentarios sobre el manuscrito, y a Juan S. Larrahondo C. por su apoyo en la edición del artículo para publicación.

Referencias

- [1] Ali, S.H., Giurco, D., Arndt, N., Nickless, E., Brown, G., Demetriades, A. et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance. *Nature* [online]. 543(7645), pp. 367-372, 2017. Available at: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature21359>
- [2] Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW). Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros [online]. 2010. Available at: www.elaw.org
- [3] Fourie, A.B., Notas del curso de verano "Integrated Tailings Management." Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana; 2016.
- [4] Fourie, A.B., No more tailings dams! Are these realistic alternatives? In: *Tailings 2015*. Santiago, Chile: GECAMIN; 2015.
- [5] Lu, Z. and Cai, M., Disposal methods on solid wastes from mines in transition from open-pit to underground mining. *Procedia Environmental Sciences*. 16, pp. 715-721, 2012. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.10.098
- [6] SERNAGEOMIN. Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. 2007.
- [7] Dimitrova, R.S. and Yanful, E.K., Factors affecting the shear strength of mine tailings/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy. *Engineering Geology*, Elsevier B.V. [online]. 125, pp. 11-25, 2012. Available at: DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.10.013
- [8] Dimitrova, R.S. and Yanful, E.K., Undrained strength of deposited mine tailings beds: effect of water content, effective stress and time of consolidation. *Geotechnical and Geological Engineering*. 29(5), pp. 935-951, 2011. DOI: 10.1007/s10706-011-9428-7
- [9] Robertson, S. and Kirsten Inc., Draft acid rock drainage technical guide, [online]. Vol. 1, Vancouver, BC, Canada, 1989. Available at: <http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geoscience/PublicationsCatalogue/MiscellaneousPublications/Documents/DraftAcidRockDrainageTechGuideVol.1.pdf>
- [10] Dold, B., Submarine Tailings Disposal (STD)—A review. *Minerals* [online]. 4(3), pp. 642-666, 2014. Available at: <http://www.mdpi.com/2075-163X/4/3/642>
- [11] Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento, 1984, 140 P.
- [12] Ministerio de Energía y Minas del Perú. Guía ambiental para el manejo de relaves mineros, 1995.
- [13] Golder Associates. Galería de proyectos. <http://www.golder.com.pe>. 2016.
- [14] Klohn, E.J., Tailings dams in Canada. *Geotechnical News*. 1997.
- [15] Compañía Minera Antamina. Componentes de la mina. <http://www.antamina.com/>. 2016.
- [16] Callahan, P., Antamina field trip (Comunicación personal). Atlanta, GA; 2011.
- [17] International Commission on Large Dams (ICOLD). Tailings dams - Risk of dangerous occurrences (Bulletin 121). Paris, 2001.
- [18] Azam, S. and Li, Q., Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*. 28(4), pp. 50-53, 2010.
- [19] WISE. Chronology of major tailings dam failures. [Online]. Available at: <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. 2016.
- [20] Escobar, A. y Martínez, H., El sector minero colombiano actual. En: *Insumos para el desarrollo del Plan Nacional de Ordenamiento Minero*. 2014, pp. 1-29.
- [21] Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín y Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Definición de los escenarios y estrategias para el sector minero colombiano con una visión a 20 años, 2014.
- [22] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). Plan nacional para el desarrollo minero: visión al año 2019 [online]. Republica de Colombia; 2006, 125 P. Available at: http://www.upme.gov.co/Docs/PNDM_2019_Final.pdf
- [23] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Política ambiental para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos [online]. 2005, 122 P. Available at: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialUrbana/pdf/sustancias_químicas_y_residuos_peligrosos/Politica_Residuos_peligrosos.pdf
- [24] Morgenstern, N., Vick, S.G., Watts, B.D. and Viotti, C., The Fundão tailings dam investigation [online]. 2016. Available at: <http://fundaoinvestigation.com/>
- [25] Ministerio de Minas & Energía y Ministerio de Ambiente. Guía Minero Ambiental 2-Explotación. 2001, 112 P.
- [26] Ministerio de Ambiente. Guía Minero Ambiental 3-Beneficio y transformación. Republica de Colombia, 2002, pp. 1-109.
- [27] Anglo Gold Ashanti. Resumen: nuestra posición. Informe de Colombia Solidarity Campaign, La Colosa, crónica de una muerte anunciada. 2014.
- [28] Colombia Solidarity Campaign. La Colosa: una muerte anunciada [online]. London: BM Colombia Solidarity Campaign, 2013, 116 P. Available at: https://www.colombiasolidarity.org.uk/attachments/article/610/LA_COLOSA_Una_Muerte_Anunciada.pdf
- [29] Anglo Gold Ashanti. Estudio de impacto ambiental 2015 - Proyecto minero Gramalote. 2015.
- [30] Red Eagle, Golder, A., Amended NI 43-101 Technical report feasibility study of Santa Rosa Gold. 2014.
- [31] Wilson, S., Olin, E., Tinucci, J., Swanson, B., Poeck, J. and Willow, M., NI 43-101 Technical report-preliminary economic assessment Miraflores property. 2013, pp. 1-296.
- [32] Cobos, D., Visita técnica proyecto minero Santa Rosa (Comunicación personal), 2016.
- [33] Ministerio de Minas y Energía. Política nacional para la formalización de la minería en Colombia. Republica de Colombia, 2014, pp. 1-111.
- [34] Tecnología Minera. Espesadores. [en línea]. Disponible en: <http://www.tecnologiaminera.com/tm/novedad.php?id=98>
- [35] Golder Associates. Experiencias de operación de depósitos de relaves espesados y filtrados. [en línea]. Disponible en: http://www.iimp.org.pe/pptjm/jm20131017_relaves.pdf. 2013. p. 1-54.
- [36] Verburg, R.B.M., Use of paste technology for tailings disposal: potential environmental benefits and requirements for geochemical characterization. In: *IMWA Symposium 2001*. 2001, 13 P.

- [37] Slottee, J.S., Update on the application of paste thickeners for tailings disposal - mine paste backfill. In: International Seminar on Paste and Thickened Tailings Paste and Thickened Tailings-Paste 2004. 2004, pp. 1-7.
- [38] Jewell, R., The evolution of paste and thickened tailings. Australian Centre for Geomechanics Newsletter, 35(December), pp. 1-3, 2010.
- [39] Helinski, M., Fahey, M. and Fourie, A., Coupled two-dimensional finite element modelling of mine backfilling with cemented tailings. Canadian Geotechnical Journal. 47(11), pp. 1187-1200, 2010. DOI: 10.1139/T10-020
- [40] Benzaazoua, M., Belem, T. and Bussière, B., Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill. Cement and Concrete Research. 32(7), pp. 1133-1144, 2002. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00752-4
- [41] Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman, P. and Verburg, R., Cementitious backfill with high sulfur content: physical, chemical, and mineralogical characterization. Cement and Concrete Research. 29(5), pp. 719-725, 1999. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00023-X
- [42] Revell, M. and Sainsbury, D.P., Paste bulkhead failures. International Symposium on Mine Fill-Minefill 2007, Montreal, Quebec, 2007.
- [43] Rankine, R.M.A., The geotechnical characterisation and stability analysis of BHP Billiton's Cannington Mine paste fill. Ph.D. Thesis, James Cook University, Australia, 2004.
- [44] Fahey, M., Helinski, M. and Fourie, A., Some aspects of the mechanics of arching in backfilled stopes. Canadian Geotechnical Journal. 46(11), pp. 1322-1336, 2009. DOI: 10.1139/T09-063
- [45] Gewanlal, C. and Robinson, B., A geosynthetic alternative to traditional sand filter drains in a piggy-back tailings storage facility. South African Institution of Civil Engineers. (April), pp. 64-68, 2012.
- [46] Blight, G.E., Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. CRC Press/Taylor & Francis Group; 2010, 634 P. DOI: 10.1201/9780203859407
- [47] Vick, S.G., Planning, design, and analysis of tailings dams. BiTech Publishers, 1990.
- [48] Cornwall, N., Submarine tailings disposal in Norway's fjords: is it the best option?. MSc. Thesis, IIIIEE, 2013.
- [49] Coumans, C., Introduction: submarine tailings disposal. STD Toolkit. [online]. 2002. Available at: https://miningwatch.ca/sites/default/files/01.STDtoolkit.intr_.pdf
- [50] European Commission. Reference document on best available techniques for management of tailings and waste-rock in mining activities [online]. 2009. Available at: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr_adopted_0109.pdf
- [51] COLCIENCIAS. Ciencia, tecnología e innovación para el desarrollo minero de Colombia [online]. 2014. Available at: http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/forum_topic/3655/files/ciencia_y_tecnologia_para_la_mineria.pdf

L.N. Beltrán-Rodríguez, is received in Civil Engineering degree from Universidad Nacional de Colombia (Bogotá), and MSc. in Civil Engineering from Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Her graduate research involved physical and numerical modeling of tailings flow via instrumented flume experiments and CFD simulations. Her professional experience focuses on geotechnical engineering, particularly subsurface field exploration, geotechnical building foundation design, slope stability analyses, and landslide hazard and risk mapping. ORCID: 0000-0003-0136-2241

J.M. Larrahondo, is received both Ph.D. and MSc. of Science in Civil Engineering from the Georgia Institute of Technology, as well as a Civil Engineering degree from Universidad Nacional de Colombia. His research interests include environmental geotechnics; geotechnical behavior, engineered disposal, and beneficial reuse of municipal, mining, and energy waste; gassy soils; engineered geomaterials for geotechnical applications; and in-situ soil testing via direct-push methods. His professional experience includes geotechnical dam design, slope stability, and landslide hazard and risk mapping. He frequently serves as peer reviewer for international journals. He is currently the leader of Pontificia Universidad Javeriana's CECATA research group. ORCID: 0000-0002-3681-3383

D. Cobos, holds PhD. and MSc. in Geotechnical Engineering from the University of California at Berkeley. He specializes in mining waste management, foundation analysis, risk mitigation, and forensic engineering. His professional experience includes tenures at URS Corp. (currently AECOM), Golder Associates, Geotecnología, and recently he heads Dynami Geoconsulting in Colombia. He is an adjunct faculty at Pontificia Universidad Javeriana and Escuela Colombiana de Ingeniería. ORCID: 0000-0003-3118-2268

Identification, analysis and evaluation of risks associated with gold mining in Marmato, Caldas

Andrea Jimena Motta-Pascuas, Mario Alfonso Ustariz-Durán & Oswaldo Ordoñez-Carmona

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ajmottap@unal.edu.co, ing.marioustariz@gmail.com, oordonezc@unal.edu.co

Received: October 19th, 2017. Received in revised form: January 16th, 2018. Accepted: May 16th, 2018

Abstract

In the municipality of Marmato, region in which the mining tradition of gold has been present for over 450 years, the weak planning and the lack presence of the State, has caused an mining environmental crisis that goes from the uncontrolled and chaotic opening of UPM across the municipality, until overlapping titles and the vulnerability of some areas as a result of improper disposal of sterile material throughout its slopes. As a consequence of such a scenario, the research conducted in the Marmato Mining District (DMM) in order to identify, analyze and evaluate the risks associated with gold mining in 240 UPM with reference to the methodology described in the Manual for Risk Assessment of Abandoned Mining Operations or Paralyzed (FMA/P), where we present calculations and standard features like the Rigour of the Consequences (SC) related to the damage that can be generated by the presence of the risk over a receptor, be it a human being or the environment, as well as the calculation of the Probability Index (IP) which is obtained by a two variables matricial combination. One of those variables is linked to the time in which the receptor is exposed to the risk. Added to the estimation of these variables, it is necessary a delimitation of each scenario which is why we define risk scenarios by security (ERS) and by contamination (ERC) in order to prioritize them at the Mining Distict. The main conclusion we got is that there's a high probability of occurrence of a landslide or avalanche on the top of the DMM and a possible way to find a solution is formulating infrastructure projects to exploit the sterile material collected from the UPM.

Keywords: mining risks; gold mining tradition; Marmato mining district.

Identificación, análisis y evaluación de riesgos asociados a la actividad minera de oro en el Municipio de Marmato, Caldas

Resumen

En el municipio de Marmato, una región cuya tradición minera de oro ha estado presente por más de 450 años, la falta de planificación y presencia del estado ha ocasionado una crisis minero-ambiental que va desde la explotación descontrolada y caótica de las Unidades Productivas Mineras (UPM) en todo el municipio, hasta la superposición de títulos y la vulnerabilidad de algunas zonas, ocasionada por la la disposición inadecuada de material estéril a lo largo y ancho de sus laderas. Consecuencia de tal panorama, surge la investigación realizada en el Distrito Minero de Marmato (DMM) con el fin de identificar, analizar y evaluar los riesgos asociados a la actividad minera aurífera en las 240 UPM localizadas en este municipio, tomando como referencia la metodología descrita en el Manual de evaluación de riesgos de las faenas mineras abandonadas o paralizadas (FMA/P), en la cual se presentan los cálculos y estandarización de parámetros como la Severidad de las Consecuencias (SC) relacionado al daño que puede generar la generación de un riesgo sobre un receptor bien sea personas o medio ambiente, así como también el cálculo del parámetro de Índice de Probabilidad (IP) el cual es obtenido a través de una combinación matricial de dos variables, una de las cuales tiene que ver con el tiempo en el cual dicho receptor se encuentra propenso a este riesgo, adicional al cálculo de estas variables es necesario alinear o delimitar cada uno de los escenarios por lo que se definen los escenarios de riesgos por seguridad (ERS) y por contaminación (ERC) para establecer una priorización de los mismos en el distrito minero, obteniendo como gran conclusión que la generación de movimiento en masa o avalanchas en la parte alta del DMM es eminente y una solución a ello es la generación de proyectos de infraestructura donde se pueda generar una utilidad al material estéril de las UPM.

Palabras clave: riesgos mineros; tradición minera aurífera; unidad productiva minera; distrito minero de Marmato; índice de probabilidad de ocurrencia; severidad de las consecuencias; colas.

How to cite: Motta-Pascuas, A.J., Ustariz-Durán, M.A. and Ordoñez-Carmona, O., Identificación, análisis y evaluación de riesgos asociados a la actividad minera de oro en el Municipio de Marmato, Caldas. Boletín de Ciencias de la Tierra, 44, pp. 21-30, Julio, 2018.

1. Introducción

Las causas de los problemas de seguridad en el sector minero en Colombia se debe a las malas prácticas mineras inconscientes y desconocimiento de los controles tanto ambientales como de seguridad, enfocándose tan solo en el conocimiento empírico, son el reflejo de la alta tasa de accidentalidad y mortalidad en las labores mineras. Prueba de tal panorama se refleja en las cifras reportadas por la Agencia Nacional de Minería (ANM), en donde se destacan datos de 898 emergencias y 1.080 fatalidades provocadas por esta actividad, en el periodo de 2005-2016 [1].

Uno de los lugares de Colombia en donde se escenifica este tipo de conflicto es el municipio de Marmato, una población multiétnica donde conviven 8.848 habitantes [2], situada en el noroccidente del departamento de Caldas, en el flanco este de la cordillera occidental y en la vertiente occidental del río Cauca; debido a que en el pesebre de oro de Colombia, como se le conoce al municipio, la base de la economía se ha enmarcado en la explotación minera aurífera, la cual históricamente se ha desarrollado de manera artesanal con sistemas muy poco tecnificados desde la época de la Colonia; lo que ha provocado graves problemas de contaminación hídrica causada por el vertimiento de colas y utilización de químicos en el proceso de beneficio exponiendo a la comunidad marmateña que toman el agua de las quebradas. Del mismo modo, esta explotación ha provocado problemas de erosión causantes de deslizamientos, agrietamientos y hundimientos de la infraestructura civil del municipio, entre otros impactos.

Como consecuencia de tal realidad surgió la necesidad de formular acciones concretas para minimizar los riesgos, disminuir el número de emergencias mineras y la severidad de las mismas, buscando salvaguardar la vida e integridad física del personal que labora o recorre las explotaciones mineras.

La metodología empleada para el trabajo de identificación, análisis y evaluación de riesgos asociados a la actividad minera de oro en el municipio de Marmato fue tomada del Manual de evaluación de riesgos de las faenas mineras abandonadas o paralizadas (FMA/P); la cual se ajustó a las condiciones específicas de la actividad minera del municipio, con el fin de incluir las 240 UPM ubicadas en el Distrito Minero de Marmato (DMM), que corresponde al centro aurífero más importante del Departamento de Caldas.

2. Generalidades

2.1. Localización

Marmato está localizado en el flanco oriental de la cordillera occidental y en la vertiente occidental del río Cauca (Imagen 1). Este municipio es la puerta de entrada al Departamento de Caldas por el Noroccidente y se encuentra topográficamente en la zona occidental del relieve conocido como el macizo de los mellizos.

Sus coordenadas geográficas son 5°29' Norte y 75°36' Oeste. Está ubicado a una altura de 1.310 msnm y es el municipio más pequeño del departamento de Caldas presentando una extensión de 41 Km².

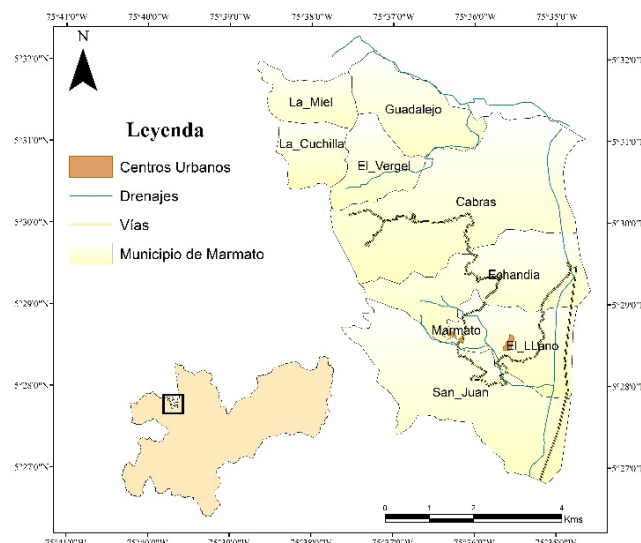


Imagen 1. Localización municipio de Marmato, Caldas.

Fuente: Propia

2.2. Marco geológico

2.1.1. Geología regional

El Distrito Minero de Marmato se encuentra localizado en el terreno geológico Calima [3] limitado por el sistema de fallas Cauca-Romeral, que de Sur a Norte deforma todas las unidades geológicas a lo largo del valle del río Cauca y acota como mínimo dos ambientes geodinámicos diferentes, uno al Este (Cordillera Central), de afinidad continental caracterizado por rocas metamórficas e ígneas plutónicas, mientras que al Oeste (Cordillera Occidental) rocas de afinidad oceánica, caracterizadas por rocas vulcano-sedimentarias del mencionado sistema de fallas [3,4].

Las unidades geológicas más antiguas corresponden a las rocas metasedimentarias y metavolcánicas del Complejo

Arquí [5] y las más jóvenes corresponden a la Formación Amagá de edad Oligocena y la Formación Combia de edad Miocena tardía. Cuerpos pequeños de rocas gabroicas y ultramáficas del Triásico constituyen la separación litoestratigráfica en el área [6].

2.1.1. Geología local

El Stock de Marmato corresponde a un cuerpo porfídico de composición andesítica-dacítica que intruye a los esquistos grafitosos del Complejo Arquía y las rocas sedimentarias de la Formación Amagá. La mineralización de oro que contiene esta roca está espacialmente asociada con los pórfidos de la Formación Combia de edad Miocena. Este cuerpo consiste de un sistema paralelo a sub paralelo de venas distensivas, vetas de cuarzo, stockworks, entre otros; rellenando zonas brechadas y falladas, con una tendencia general N30-70°W de buzamiento vertical a sub-vertical, además se ha encontrado que algunos contactos intrusivos también se encuentran mineralizados [7,4].

2.1.2. Geología estructural

El depósito de Marmato se formó a finales del mioceno en un régimen de reactivación tectónica de tipo transpresión dextral inducida por ensamble de terrenos alóctonos [8]. La principal estructura geológica en el área de Marmato corresponde a la Falla Cauca – Almaguer, la cual buza hacia el Este y muestra desplazamientos sinistro- laterales con componente inverso. Dentro del Distrito Minero de Marmato las estructuras asociadas tienen buzamientos sub-verticales con dirección aproximada entre N45°W–N70°W [1].

2.2.3. Geología económica

Marmato alberga un depósito epitermal de intermedia sulfuración, en donde la mineralización ocurre a tres niveles topográficos diferentes: la zona superior de Echandía (1.450-1.600 msnm), la zona intermedia Cien Pesos (1.300-1.450 msnm) y la zona Marmato Bajo (1.160-1.260 msnm) [7].

Actualmente Gran Colombia Gold asumió la mayoría de los títulos mineros del sector incluyendo las denominadas Zona Baja y Echandía, estimando recursos por más de 15 MOz (Millones de Onzas).

3. Estado minero de Marmato

El municipio de Marmato, región minera desde hace más de 470 años, es el arquetípico de lo que sucede en varios otros lugares del mundo, donde se enfrenta la pequeña minería local ancestral y la gran minería transnacional, con una particularidad muy importante, para Marmato la explotación de oro de veta corresponde a su vocación, con unas dinámicas sociales y culturales arraigadas en esta actividad en donde toda su historia y cultura está permeada por tal forma de trabajo de la que vive un alto porcentaje de su población [9].

Sin embargo, el panorama minero ha sido crítico por años en la Zona alta, como fue definida con la expedición de la Ley 66 que deroga la Ley 72/39 y se reglamenta mediante el Decreto 1323 de 1947, por la cual se dividió la explotación minera de Marmato en Zona alta A y Zona baja B para pequeña y mediana minería respectivamente, asociado a la problemática no sólo de informalidad minera sino a la particular situación jurídica referida a la superposición tanto en planta como en la vertical de los títulos mineros actualmente vigentes.

Según la información suministrada por la ANM a diciembre de 2015 en cuanto a titulación minera en el municipio de Marmato, se reporta un total de 121 títulos mineros, de los cuales la Autoridad Minera Departamental a septiembre de 2011, develó que la cantidad de Unidades Productivas Mineras (UPM) así como del estado contractual de los títulos mineros (Tabla 1) corresponden a un total 334 UPM y 73 minas en condición de inactividad, localizadas todas ellas sobre los títulos mineros en mención [10].

En la Imagen 2 se ilustra la localización de los títulos mineros que tiene el municipio de Marmato y la ubicación de las UPM que se analizaron en este proyecto.

Tabla 1.

Estado contractual de los títulos mineros en Marmato

Estado contractual de los títulos mineros*	
Descripción	Cantidad
Construcción y montaje	17
Exploración	13
Explotación	91
Total de títulos mineros	121

Unidades productivas mineras (UPM)**	
Activas	Inactivas
334	73

Fuente: *Adaptada de información de la Agencia Nacional de Minería (ANM) al 2015.

**Adaptada de censo minero realizado por la alcaldía de Marmato en el año 2011.

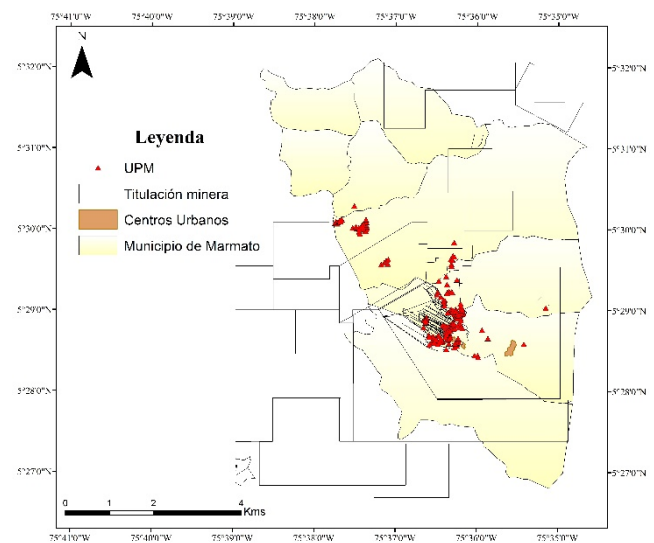


Imagen 2. Ubicación de títulos en el municipio de Marmato

Fuente: Propia

4. Panorama de riesgos en Marmato

La actividad minera es un ejercicio de alto riesgo y esta situación se agrava cuando existe una baja cultura de seguridad industrial y salud en el trabajo (SST) como la que presentan los mineros tradicionales del municipio de Marmato en actividades o infraestructuras como el acceso a las minas, manipulación de las herramientas de arranque, manipulación de los explosivos no convencionales, así como también los sistemas de cargue y transporte del material con muy bajos estándares de seguridad, como por ejemplo el sistema de transporte se realiza a través de carreta, cable aéreo (llamado de manera coloquial en Marmato como “Breques”), coches de madera, volquetas por las vías municipales y a lomo de mula, entre otros.

Las consecuencias de los accidentes en las UPM del municipio de Marmato son por lo general catastróficos, presentándose tanto en el interior de las minas subterráneas como en su exterior. En el interior de las UPM se presentan traumas en las personas debido al desprendimiento de materiales o rocas, caídas o atrapamiento, causando

discapacidades permanentes hasta la muerte, mientras que en el exterior de las minas a causa de las caídas a nivel y desniveles, daño electromecánico por contacto o choque de personas con los equipos de transporte y preparación de los explosivos no convencionales, se presentan también ese tipo de consecuencias catastróficas en las personas.

En forma general, las UPM del municipio de Marmato, no cuentan con procedimientos estandarizados para la ejecución de las operaciones mineras unitarias. Los procedimientos y controles existentes para minimizar los escenarios de riesgos se basan en la experiencia empírica de cada uno de los operarios mineros de la zona a la hora de realizar su labor.

5. Metodología de identificación y valoración de escenarios de riesgos mineros

Con el fin de identificar, describir, analizar y valorar los riesgos derivados de la actividad minera aurífera en el municipio de Marmato se presenta como referencia la metodología descrita en el *Manual de evaluación de riesgos de las faenas mineras abandonadas o paralizadas* (FMA/P); presentando las debidas modificación en cuanto a la condición activa de las minas del municipio de Marmato. Así mismo se presentan como foco cada uno de los componentes de una actividad minera y las actividades o procesos que estas desarrollan.

5.1. Parámetros evaluados

- Existencia de un circuito de ventilación y registro de medición periódica de gases.
- Existencia de controles y equipos para el manejo de aguas subterráneas.
- Existencia de plantas eléctricas, mantenimiento y aislamiento de equipos y conducción eléctrica.
- Uso adecuado y de calidad de los Elementos de Protección Personal (EPP).
- Existencia de la señalización pertinente.
- Existencia de programas de mantenimiento preventivo de equipos y herramientas.
- Condición de sostenimiento de túneles.
- Existencia de planes de atención de emergencias.
- Manipulación de explosivos y sustancias químicas realizada por personal capacitado.
- Dimensiones de los túneles mínimas requeridas.
- Condición de la atmosfera minera óptima.
- Planes de mantenimiento y tecnología empleada en los equipos.
- Condiciones de pisos del túnel, iluminación y visibilidad.
- Proceso de beneficio
- Capacidad del entable y registro de la cantidad de material procesado.
- Manejo de agua, vertimientos e insumos químicos.
- Manejo del material estéril (Colas y escoria).
- Condiciones de los equipos y dimensiones del entable minero.
- Existencia de señalización de seguridad.

5.2. Definición de lo escenarios de riesgos

Los escenarios de riesgos, hacen alusión a aquel entorno o medio en el cual se pueda evaluar la probabilidad de ocurrencia de un evento y sus consecuencias derivadas. Para este caso se discriminaron dichos escenarios en dos categorías: Seguridad y Contaminación.

5.2.1. Escenarios de riesgos según la seguridad (ERS)

Comprenden los casos en los que se reúnen las condiciones de peligro para un receptor potencial, sean las personas (P) o la actividad minera (AM), pudiendo resultar en consecuencias leves o graves dependiendo del nivel de exposición y la frecuencia de ocurrencia del evento. En la Tabla 2 se resumen los escenarios de riesgos por seguridad planteados.

5.2.2. Escenarios de riesgos según la Contaminación (ERC)

Comprende los casos en los que se reúnen las condiciones de peligro que afectan o generan un daño al medio ambiente, resultando consecuencias leves o graves dependiendo del nivel de exposición y la frecuencia de ocurrencia del escenario. En la Tabla 3 se resumen los escenarios según la contaminación planteados.

Tabla 2.
Resumen de escenarios de riesgos según la seguridad

Escenarios de riesgos según la seguridad (ERS)	Código
Asfixia	ERS-1
Asfixia por Inmersión	ERS-2
Caída a desniveles	ERS-3
Caída a nivel	ERS-4
Caída de Equipos y/o chatarra	ERS-5
Caída de Rocas	ERS-6
Colapso del frente de explotación	ERS-7
Colapso de túnel de transporte	ERS-8
Contacto con superficie cortante	ERS-9
Contacto eléctrico	ERS-10
Daño electromecánico	ERS-11
Explosiones no programadas	ERS-12
Incendio de origen eléctrico	ERS-13
Movimientos de masa	ERS-15
Movilización de material estéril de la mina	ERS-16
Proyecciones de roca	ERS-17
Contacto con llamas o superficies calientes (Quemaduras)	ERS-18
Riesgos biológicos	ERS-19
Riesgos biomecánico y físico	ERS-20
Superficies lisas e inclinadas	ERS-21
Vibraciones	ERS-22
Humedad anormal	ERS-23
Iluminación deficiente	ERS-24
Inundación	ERS-25
Subsistencia	ERS-26
Estrés térmico	ERS-27
Manejo inadecuado de explosivos	ERS-28
Colapso de la infraestructura (Oficinas, talleres, entable)	ERS-29
Alteración Orden público y hurto	ERS-30

Fuente: Propia.

Tabla 3.
Resumen de escenarios de riesgos según la contaminación

Escenarios de riesgos por contaminación (ERC)	Código
Drenaje con presencia de contaminantes y aguas ácidas	ERC-1
Manipulación de sustancias tóxicas	ERC-2
Modificación del drenaje en aguas superficiales	ERC-3
Movilización de material estéril del proceso de beneficio	ERC-4
Presencia de contaminantes tóxicos y sedimentos en aguas	ERC-5
Presencia de alto nivel de ruido	ERC-6
Presencia de gases contaminantes	ERC-7
Presencia de material particulado (polvo)	ERC-8

Fuente: Propia.

5.3. Estimación del Índice de Probabilidad de Ocurrencia (IP)

Para obtener el valor de probabilidad de ocurrencia o frecuencia con la cual ocurre o se manifiesta un escenario de riesgo (Seguridad o Contaminación), se realiza el cálculo del Índice de Probabilidad (IP). Para obtener dicho valor es necesario calcular dos parámetros que evidencien el estado en que se encuentra el equipo o área donde se presenta el escenario de riesgo y el tiempo en el cual los receptores se encuentran presentes, estos se definen como el nivel de deficiencia y de exposición (Ecuación 1).

Ecuación 1. Matriz de valoración IP

$$Matriz\ IP = [ND \times NE]$$

Fuente: SERNAGEOMIN - BGR, 2008

Dónde:

- IP = Índice de Probabilidad
- ND = Nivel de Deficiencia del escenario de riesgo
- NE = Nivel de Exposición

La valoración del ND: Nivel de Deficiencia y NE: Nivel de Exposición se realiza a través de las Guías de cálculo de IP.

Una vez realizada la valoración de estos dos parámetros (ND y NE), se efectúa la categorización, estandarización y evaluación del IP bajo la combinación matricial de estos dos valores según la Tabla 4.

Tabla 4.
Matriz y estándares del Índice de Probabilidad (IP)

Nivel de Deficiencia del escenario (ND)	Nivel de Exposición (NE)			
	Esporádico (1)	Ocasional (2)	Frecuente (3)	Continuo (4)
Muy Alto	Muy Alto-1	Muy Alto-2	Muy Alto-3	Muy Alto-4
Alto	Alto-1	Alto-2	Alto-3	Alto-4
Moderado	Moderado-1	Moderado-2	Moderado-3	Moderado-4
Bajo	Bajo-1	Bajo-2	Bajo-3	Bajo-4
VALOR DEL ÍNDICE DE PROBABILIDAD (IP)				
Muy Alta			4	
Alta			3	
Moderada			2	
Baja			1	

Fuente: SERNAGEOMIN - BGR, 2008

Por último, se calcula un promedio ponderado del valor del Índice de Probabilidad (IP) asignado a cada uno de los escenarios de riesgos (Ecuación 2), con el fin de generar un único valor que nos permita medir las frecuencias de los escenarios de riesgos en particular.

Ecuación 2. Promedio ponderado del Índice de Probabilidad

$$Prom\ IP = \sum IP * X / \sum X$$

Fuente: Propia a partir de (SERNAGEOMIN - BGR, 2008)).

Dónde:

- Prom IP = Promedio ponderado del Índice de Probabilidad
- IP = Índice de Probabilidad
- X = Número de UPM en el que se aprecia el escenario de riesgo

5.4. Estimación de la Severidad de Consecuencias (SC)

Para estimar la Severidad de las Consecuencias (SC) sobre los potenciales receptores cuando un escenario de riesgo se vuelve efectivo es relativamente complejo, además que éstos; debido a su procedencia, están íntimamente relacionados con los receptores (personas, medio ambiente y actividad minera); por lo tanto, fue necesario definir criterios que permitieran categorizar y parametrizar la evaluación de este parámetro (Tabla 5).

Para tal fin se asignó un valor entero de 1 a 4, por categorías definidas como baja, media, alta y catastrófica respectivamente para los diferentes receptores. Una vez generadas estas calificaciones de SC para cada uno de las UPM según la metodología y estandarización de los criterios de evaluación, se realiza un promedio ponderado del valor asignado a cada uno de los escenarios de riesgos (Ecuación 3).

Ecuación 3. Promedio ponderado de la Severidad de las Consecuencias

$$Prom\ SC = \sum SC * X / \sum X$$

Fuente: Propia a partir de (SERNAGEOMIN - BGR, 2008)).

Dónde:

- Prom SC = Promedio ponderado de la Severidad de las consecuencias
- SC = Valor Severidad de consecuencias
- X = Número de UPM en la que se presenta el escenario de riesgo

Tabla 5.
Criterios para definir la Severidad de las Consecuencias

Receptores	Criterios para Definir la severidad de las Consecuencias	
	Seguridad	Contaminación
Personas	Lesiones físicas o pérdidas de vidas humanas	Daño a la salud humana
Medio ambiente	Pérdida de superficie donde se desarrolla vida acuática, terrestre o áreas protegidas	Superficie potencialmente afectada donde se desarrolla vida acuática, terrestre o áreas protegidas

Fuente: Propia a partir de (SERNAGEOMIN - BGR, 2008)).

Las dos ecuaciones mencionadas anteriormente fueron generadas por el grupo de trabajo de la Universidad Nacional de Colombia con el fin de obtener un único y solo valor de IP y SC del escenario de riesgo evaluado y así determinar su categoría o nivel dentro de la matriz de priorización.

5.5. Estimación de matriz de evaluación de riesgos y priorización

La matriz de riesgos se formuló mediante la combinación de los factores Índice de Probabilidad de ocurrencia (IP) y Severidad de las consecuencias (SC) con el propósito de determinar los niveles de importancia del escenario de riesgo valorado. La priorización es catalogada como SIGNIFICATIVOS (celdas de color rojo y amarillo) y NO SIGNIFICATIVOS (celdas de color verde y azul) (Tabla 6).

6. Diagnóstico, identificación y valoración de los escenarios de riesgos según la seguridad y contaminación en Marmato

6.1. Diagnóstico de la actividad minera

En el municipio de Marmato se visitaron y evaluaron un total de 240 UPM, todas de tipo subterránea, distribuidas por veredas y sectores conocidos por los lugareños de Marmato, siendo la vereda Echandia la que presenta mayor cantidad de UPM con un total de 125 UPM, mientras que el sector denominado La Llorona ubicado en la vereda Cabras presenta la mayor cantidad con un total de 53 UPM, seguido del sector de Cien Pesos localizado en la vereda Echandia con 10 menos. De estas UPM visitadas se aprecia que el 55% se encuentran en operación y el 45% inactiva o abandonada.

Tabla 6. Matriz de priorización de riesgos.

Índice de Probabilidad (IP)	Severidad de las Consecuencias (SC)			
	Baja (1)	Moderada (2)	Alta (3)	Catastrófica (4)
Muy Alta	1 Muy Alta	2 Muy Alta	3 Muy Alta	4 Muy Alta
Alta	1 Alta	2 Alta	3 Alta	4 Alta
Moderada	1 Moderada	2 Moderada	3 Moderada	4 Moderada
Baja	1 Baja	2 Baja	3 Baja	4 Baja
Descripción de priorización				
Significativa Tipo 1	Escenarios de riesgo en los que los planes de intervención deben efectuarse de manera inmediata o a corto plazo			
Significativa Tipo 2	Escenarios de riesgo en los que los planes de intervención deben efectuarse a corto o mediano plazo			
No Significativa Tipo 1	Escenario de riesgo en los que los planes de intervención deben efectuarse a mediano o largo plazo y las UPM conviven de manera esporádica con estos riesgos			
No Significativa Tipo 2	Escenarios de riesgo en los que los planes de intervención deben efectuarse a largo plazo y las UPM pueden convivir con los riesgos			

Fuente: Propia.

6.2. Identificación de los escenarios de riesgos según la seguridad y la contaminación de la actividad minera

En las diferentes UPM del municipio de Marmato se identificaron los escenarios de riesgos discriminados por seguridad presentando como receptor las personas y medio ambiente respectivamente, los cuales se resumen en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7. Escenarios de riesgo por seguridad.

Escenarios de riesgos según la seguridad (ERS)	Código	Total UPM
Asfixia	ERS-1	79
Asfixia por Inmersión	ERS-2	3
Caída a desniveles	ERS-3	102
Caída a nivel	ERS-4	91
Caída de Equipos y/o chatarra	ERS-5	61
Caída de Rocas	ERS-6	171
Colapso del frente de explotación	ERS-7	86
Colapso de túnel de transporte	ERS-8	100
Contacto con superficie cortante	ERS-9	52
Contacto eléctrico	ERS-10	57
Daño electromecánico	ERS-11	27
Explosiones no programadas	ERS-12	65
Incendio de origen eléctrico	ERS-13	17
Movimientos de masa	ERS-15	39
Movilización de material estéril de la mina	ERS-16	47
Proyecciones	ERS-17	82
Contacto con llamas o superficies calientes (Quemaduras)	ERS-18	6
Riesgos biológicos	ERS-19	83
Riesgos biomecánico y físico	ERS-20	84
Superficies lisas e inclinadas	ERS-21	46
Vibraciones	ERS-22	65
Humedad anormal	ERS-23	26
Iluminación deficiente	ERS-24	62
Inundación	ERS-25	7
Estrés térmico	ERS-27	44
Manejo inadecuado de explosivos	ERS-28	71
Colapso de la infraestructura (Oficinas, talleres, entable)	ERS-29	4
Alteración Orden público y hurto	ERS-30	1

Fuente: Propia.

De los 30 escenarios de riesgo por seguridad evaluados, los correspondientes a Caída de Rocas (ERS-6), Caída a desniveles (ERS-3) y Colapso de túnel de transporte (ERS-8) presentan la mayor ocurrencia en todas las labores mineras. El ERS-6, correspondiente al riesgo de caída de rocas (Imagen 3), encontrado en un total de 171 minas, es recurrente en toda la zona, llegando a afectar incluso al mismo casco urbano de Marmato y obedece principalmente al grado de exposición de las personas al riesgo por caída de rocas ya que no existe ningún tipo de actividades o planes de mitigación que disminuyan la existencia o control de este escenario.

El riesgo por caída a desnivel (ERS-3) se evidenció en un total de 102 UPM, en donde se han adelantado clavadas o accesos verticales para seguir la explotación de las vetas. Estos cambios de nivel no presentan el adecuado acceso para las personas así como tampoco señalización de seguridad, siendo un riesgo que podría ocasionar discapacidades permanentes o la muerte.

El escenario de riesgo de colapso del túnel de transporte (ERS-8) se encuentra en la precaria infraestructura de sostenimiento, limitada en su mayor parte a zonas de saprolito; estos sostenimientos son realizados con canastas de madera, puertas alemanas atizadas y forradas, presentando cápicos reventados o en ocasiones podridos (Imagen 4).

Para cada una de las UPM visitadas en el municipio de Marmato se identificaron los siguientes escenarios de riesgos por contaminación (riesgo ambiental) (Tabla 8).

De los ocho (8) escenarios de riesgo por contaminación evaluados en el municipio de Marmato, se encontró que los de mayor impacto al medio ambiente y más recurrentes corresponden a: escenario de riesgo Presencia de material particulado (ERC-8) seguido de Modificación del drenaje en aguas superficiales (ERC-3) y Drenaje con presencia de contaminantes y aguas ácidas (ERC-1).

La presencia de material particulado y polvo (ERC-8) fue el riesgo predominante en las minas visitadas (Imagen 5), manifestándose de dos formas: la primera ocurre en el momento de la operación unitaria de perforación, la cual se realiza en la mayoría de los casos en seco bien sea empleando



Imagen 4. Escenario de riesgo de colapso del túnel de transporte (ERS-8)
Fuente: Propia.

Tabla 8.
Escenarios de riesgo por contaminación.

Escenarios de riesgos según la contaminación (ERC)	Código	Total UPM
Drenaje con presencia de contaminantes y aguas ácidas	ERC-1	15
Manipulación de sustancias tóxicas	ERC-2	9
Modificación del drenaje en aguas superficiales	ERC-3	17
Movilización de material estéril del proceso de beneficio	ERC-4	2
Presencia de contaminantes tóxicos y sedimentos en aguas	ERC-5	12
Presencia de alto nivel de ruido	ERC-6	12
Presencia de gases contaminantes	ERC-7	9
Presencia de material particulado (polvo)	ERC-8	22

Fuente: Propia.

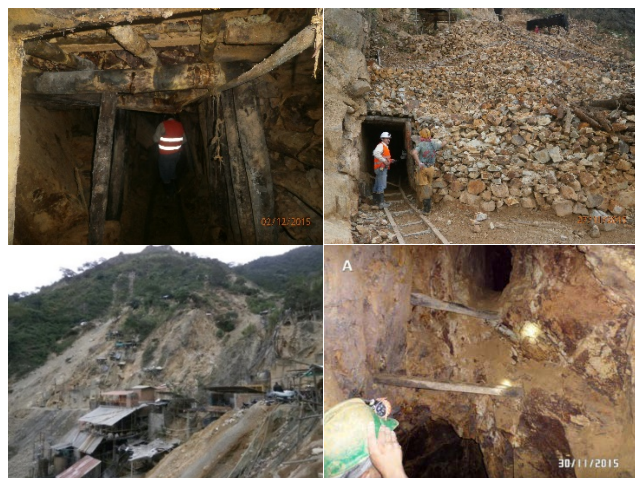


Imagen 3. Escenario de riesgo por Caída de Rocas (ERS-6).
Fuente: Propia.



Imagen 5. Escenario de riesgo presencia de material particulado (ERC-8) en la Mina la Targueña.
Fuente: Propia.

el martillo neumático o con taladro eléctrico la cual libera una gran cantidad de material particulado PM10 a la atmósfera minera. La segunda se evidenció en la disposición inadecuada de estériles al aire libre y tránsito continuo de volquetas a través de las vías de acceso, las cuales no se encuentran pavimentadas y sin ningún tipo de riego de agua continuo para disminuir la generación de polvo.

6.3. Priorización de los escenarios de riesgo por seguridad

Esta priorización se realizó mediante la combinación matricial en la que se conjuga la valoración de los promedios ponderados de los parámetros de Severidad de las Consecuencias (SC) y del Índice de Probabilidad (IP), obteniendo categorías de dichos riesgos según el tiempo y medidas de acción a tomar (Significativas y No Significativas).

En general, las actividades mineras del municipio de Marmato presentan escenarios de riesgo por seguridad en las personas con valores de priorización entre Significativa Tipo 2 y No Significativa Tipo 1, es decir que los planes de intervención o acciones de control y/o mitigación se deben realizar desde corto a mediano plazo.

En la Tabla 9 se presenta la matriz de priorización de los riesgos según la seguridad para las personas evaluadas en el municipio de Marmato.

Los escenarios de riesgo por seguridad para las personas en los cuales se deben implementar los planes de intervención entre corto y mediano plazo en el municipio de Marmato son: caída a desniveles (ERS-3), caída de Rocas (ERS-6), colapso de túnel de transporte (ERS-8), explosiones no programadas (ERS-12), movimientos de masa (ERS-15) movilización de material estéril de la mina (ERS-16), vibraciones (ERS-22) y manejo inadecuado de explosivos (ERS-28) los cuales se localizan en el sector amarillo (Significativa tipo 2) y más cercano a la zona roja de matriz de priorización. Mientras que los escenarios de riesgos en los cuales las UPM pueden convivir con ellos sin que se presenten grandes eventualidades son: Incendio de origen eléctrico (ERS-13),

Tabla 9. Matriz de priorización de riesgo según la seguridad en las personas.

Índice de Probabilidad	Severidad de las Consecuencias			
	Baja (1)	Moderada (2)	Alta (3)	Catastrófica (4)
Muy Alta				
Alta	ERS-19	ERS-4, ERS-5, ERS-1, ERS-10, ERS-20, ERS-21, ERS-23, ERS-24, ERS-25, ERS-27, ERS-9	ERS-3, ERS-6, ERS-15, ERS-16	
Moderada	ERS-13, ERS-18	ERS-7, ERS-11, ERS-17	ERS-8, ERS-12, ERS-22, ERS-28	
Baja				

Fuente: Propia.

Tabla 10. Matriz de priorización de riesgos por contaminación para el medio ambiente.

Índice de Probabilidad	Severidad de las Consecuencias			
	Baja (1)	Moderada (2)	Alta (3)	Catastrófica (4)
Muy Alta		ERC-2		
Alta		ERC-1	ERC-3, ERC-5	
Moderada	ERC-4	ERC-6, ERC-7, ERC-8		
Baja				

Fuente: Propia.

contacto con llamas o superficies calientes (Quemaduras) (ERS-18) y riesgos biológicos (ERS-19) localizados en la zona azul (No Significativa tipo 2) de la matriz.

6.4. Priorización de los escenarios de riesgo por contaminación

En general las actividades mineras del municipio de Marmato presentan escenarios de riesgo por contaminación en el medio ambiente con valores de priorización entre Significativa Tipo 2 y No Significativa Tipo 1, es decir escenarios en los que la intervención o acciones de control y/o mitigación se deben realizar desde corto a mediano plazo.

Los escenarios de riesgo por contaminación que afectan de manera directa al medio ambiente y presentan una mayor prioridad se encuentran: manipulación de sustancias tóxicas (ERC-2), modificación del drenaje en aguas superficiales (ERC-3) y presencia de contaminantes tóxicos y sedimentos en aguas (ERC-5) los cuales se encuentran en la franja amarilla de la matriz (Tabla 10).

De la matriz se concluye que los escenarios se encuentran localizados en la zona centro, lo cual nos indica que los planes de intervención a ejecutar para la mitigación de estos escenarios deben ser ejecutados en el corto y mediano plazo, iniciando por los escenarios anteriormente mencionados.

7. Recomendaciones

A continuación se enumeran algunas recomendaciones para prevenir y mitigar los riesgos asociados a la actividad minera:

- Uso de Equipos de Protección Personal (EPP), durante el desarrollo de toda la actividad minera, los cuales deben ser personales e intransferibles.
- Mantenimiento preventivo y programado de los equipos y las herramientas con los que se desarrolla la actividad minera.
- Verificación del estado de los elementos de aislamiento eléctrico en máquinas, herramientas e instalaciones.
- Implementación de escaleras de madera y cuerdas para evitar las superficies lisas y prevenir de esta manera las caídas a desnivel de los operarios de la mina.
- Tecnificar el transporte del material.

- Usar medidores de gases luego de las voladuras y antes del ingreso de los trabajadores para evitar intoxicaciones.
- Utilizar equipos de ventilación durante el desarrollo de la actividad minera, para evitar asfixia.
- Evitar el ingreso de menores de edad a la unidad minera.
- Hacer una señalización adecuada dentro y fuera de la mina.
- Disponer de lugares aptos para la acumulación de residuos sólidos y material estéril.
- Disponer de lugares seguros para el almacenamiento de explosivos y sustancias tóxicas.
- Implementar herramientas de sostenimiento adecuado de los túneles.
- Hacer una buena planificación de las actividades a desarrollar en la mina día a día.
- Implementar sistemas de tratamiento de las colas generadas en el proceso de beneficio (Relaveras)
- Construir depósitos de material estéril técnicamente aptos para el tratamiento de los estériles generados en las UPM.

8. Conclusiones

- En el municipio de Marmato se intervinieron un total de 240 UPM de las cuales el 45% (108) se encuentran inactivas, presentándose esta condición en mayor proporción en los sectores de La Llorona y Cien Pesos, los cuales pueden considerarse como un pasivo ambiental eminente para el municipio.
- De acuerdo a las condiciones jurídicas mineras que se presentan en el municipio de Marmato, referidas al amparo bajo el Decreto 2223 de 1945, la actividad minera intervenida se concentra en la denominada Zona Alta con un total de 135 UPM de las cuales el 37% (51) se encuentra inactiva y su mayor proporción se concentra en los sectores de San José y Cien pesos.
- La actividad minera del municipio de Marmato representa una de las fuentes principales de empleo para los marmateños generando un total 1.726 empleos directos de los cuales el 80% (1.381) presentan afiliaciones de seguridad social y riesgos profesionales, en mayor proporción presente en la compañía minera Mineros de Colombia de propiedad de la empresa Gran Colombia Gold.
- Los escenarios de riesgos según la seguridad (ERS) identificados en las UPM del municipio de Marmato más recurrentes son: caída a desnivel (ERS-3) evidenciado en el 43% (102) de las UPM y localizado en mayor instancia en el sector de Cien pesos, caída de rocas (ERS-6) evidenciado en el 71% (171) de las UPM y localizado en los sectores de La Llorona y Cien pesos, y colapso de túnel de transporte (ERS-8) comprobado en el 42% (100) de las UPM y localizado en mayor proporción en el sector de La Llorona, todo esto debido a los escasos protocolos de seguridad, las precarias

condiciones del sostenimiento, mantenimiento y falta de manejo geotécnico del macizo rocoso.

- Los escenarios de riesgos según la contaminación (ERC) identificados en las UPM más frecuentes son: presencia de material particulado (polvo) (ERC-8) y drenaje con presencia de contaminantes y aguas (ERC-1). El primero de ellos se presentó en el 79% (22) de las UPM en el que se identificó este escenario de riesgo, localizado principalmente en el sector de Cien pesos, mientras que el segundo se evidenció en el 72% (17) de las UPM y localizado en mayor proporción en los sectores de La Llorona y Echandia.
- Los escenarios de riesgos que presentan mayor prioridad en el municipio de Marmato respecto a la seguridad de las personas son: caída a desniveles (ERS-3), caída de Rocas (ERS-6), colapso de túnel de transporte (ERS-8), explosiones no programadas (ERS-12), movimientos de masa (ERS-15) movilización de material estéril de la mina (ERS-16), los cuales es necesario realizar acciones de mitigación en el corto y mediano plazo.
- Los escenarios de riesgos que presentan mayor prioridad en el municipio de Marmato respecto a la contaminación generada en el medio ambiente son: la modificación del drenaje en aguas superficiales (ERC-3) y presencia de contaminantes tóxicos y sedimentos en aguas (ERC-5), los cuales es necesario realizar acciones de reparación en el corto y mediano plazo.

Bibliografía

- [1] Tassinari, C.C.G., Díaz, F. and Buenaventura, J., Age and sources of gold mineralization in the Marmato mining district, NW Colombia: a Miocene–Pliocene epizonal gold deposit., *Ore Geology Reviews*, 33(3), pp. 505-518, 2008.
- [2] Agencia Nacional de Minería, Emergencias mineras, 1 Noviembre 2016. [En línea]. Disponible en: anm.gov.co/?q=emergencias_mineras.
- [3] DANE, DANE, [En línea]. Disponible en: www.dane.gov.co/reloj/. [Último acceso: 1 Noviembre 2016].
- [4] Toussaint, J.F. y Restrepo, J.J., Acreciones sucesivas en Colombia: un nuevo modelo de evolución geológica., V Congreso Colombiano de Geología, pp. 127-146, 1989.
- [5] Leal-Mejía, H., Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes: a tectono-magmatic approach. Doctoral dissertation, Universitat de Barcelona, España, 2011, 989 P.
- [6] González, H. y Maya, M., Unidades Litodémicas de la Ridge Central de Colombia.» *Boletín Geológico Ingeominas*, 35, pp. 2-3; 43-57, 1995.
- [7] Vinasco, C.J., A utilização da metodologia 40Ar–39Ar para o estudo de reativações tectônicas em zonas de cisalhamento. Paradigma: o Falhamento de Romeral nos Andes Centrais da Colômbia, M.Sc. Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Brazil, 2001, 85 P.
- [8] Sillitoe, R.H., Special paper: major gold deposits and belts of the North and South American Cordillera: distribution, tectonomagmatic settings, and metallogenic considerations, *Economic Geology*, 103(4), pp. 663-687, 2008. DOI: [10.2113/gsecongeo.103.4.663](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.4.663)
- [9] Sandoval-Robayo, M.L. y Lasso, R.M., Riesgo: teoría y realidad: el caso de Marmato, Caldas. *Luna Azul* [online]. 34, 2012, pp.170-194. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100011&lng=en&nrm=iso.

[10] Alcaldía de Marmato [En línea]. [Último acceso: Noviembre 2016].
Disponble en: www.marmato-caldas.gov.co.

A.J. Motta-Pascuas, es graduada del programa de Ingeniería Geológica en el año 2017, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Actualmente se desempeña como profesional técnico de apoyo en la Secretaría de Obras Públicas e Infraestructura de la Alcaldía de Marinilla-Antioquia, en el área de gestión del riesgo como coordinadora del Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres.
ORCID: 0000-0002-7484-0737

M.A. Ustariz-Duran, es graduado del programa de Ingeniería de Minas y Metalurgia en el año 2012, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Durante su trabajo como profesional se ha desempeñado como profesional técnico y coordinador de proyectos de extensión relacionados al sector minero de la misma Universidad concernientes con la valoración de títulos mineros, legalización y formalización minera, evaluación de riesgos asociado a la actividad minera e investigación de la trazabilidad del oro. Actualmente se desempeña como coordinador técnico del proyecto de valoración de la afectación generada por las descarga de la represa Porce III sobre los mineros tradicionales de la zona localizada aguas debajo de la presa.
ORCID: 0000-0003-0191-2557

O. Ordoñez-Carmona, es Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, MSc. y Dr. en Geociencias de la Universidad de Brasilia, Brasil; actualmente es profesor asociado adscrito a la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas, director del grupo de investigación en Georrecursos, Minería y Medio Ambiente – GEMMA; cuenta con una producción bibliográfica de 26 artículos científicos publicados en revistas indexadas por Colciencias y con una amplia experiencia en proyectos de investigación y extensión con el sector público y privado en temas relacionados con geología regional, geotecnia, geocronología, yacimientos minerales y minería en el territorio colombiano, incluyendo el desarrollo de aproximadamente 30 dictámenes técnicos periciales relacionados con problemáticas sociales, ambientales, civiles y geológico-mineras.
ORCID: 0000-0003-3472-6160

Characterization of clays materials from Guaviare river, La Paz, Colombia

David Landinez ^a, Martha Calvo ^b & Carolina Cárdenas ^c

^a Grupo de Física de Nuevos Materiales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia. dalandinezf@unal.edu.co

^b Grupo de Investigación en Bioingeniería-GIBIUD-, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C., Colombia. mpcalvoc@unal.edu.co

^c Facultad de Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia. ccardenasf@unal.edu.co

Received: October 19th, 2017. Received in revised form: March 19th, 2018. Accepted: April 15th, 2018

Abstract

Clays are the main material in ceramic elements in Colombia, which are part of the tradition, culture and money income of many families in the country. The clay used in this work was taken from the Guaviare River, located in the region of Guaviare (Colombia). A physicochemical characterization was made using the mechanic separation technique, X-ray diffraction techniques (XRD), X-ray fluorescence (FRX) and scanning electron microscopy (SEM). It was concluded that the material is composed of Silicon (50%) and Aluminum (20%) with impurities of Iron, Magnesium and Titanium. For its components this could be used as ceramic material for construction. It is desired that the results of this work help to find future uses for this clay.

Keywords: clays; characterization techniques; morphology.

Caracterización de material arcilloso obtenido del río Guaviare, vereda de La Paz, Colombia

Resumen

Las arcillas son la materia prima principal en la elaboración de elementos cerámicos en Colombia, las cuales son parte de la tradición, cultura y sustento de muchas familias del país. La arcilla en este trabajo caracterizada es proveniente de un tramo del río Guaviare localizado en la región del Guaviare (Colombia). Se realizó una caracterización fisicoquímica haciendo uso de la técnica de separación mecánica y de técnicas de difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM). Se concluyó que el material caracterizado está compuesto principalmente de Silicio (50 %) y Aluminio (20 %) con impurezas de Hierro, Magnesio y Titanio. Por sus componentes esta arcilla podría ser utilizada como material de cerámica para construcción. Se desea que los resultados obtenidos en este trabajo permitan identificar futuros uso para este material.

Palabras Clave: arcillas; técnicas de caracterización; morfología.

1. Introducción

Se considera a las arcillas como un mineral natural complejo constituido, principalmente, por una mezcla de aluminio-silicatos cristalinos, a los que se denominan minerales arcillosos; y de otros silicatos y minerales de Hierro, Calcio, Titanio, etc., acompañados frecuentemente por materia orgánica [2]. Actualmente se conoce que los minerales arcillosos son numerosos y difieren entre sí por su forma, estructura, apilamiento de capas y por la simetría que presenta su red cristalina. Químicamente, los minerales arcillosos

están constituidos por láminas de tetraedros de silicio [SiO₄] y de octaedros de aluminio [AlO₆]. Las combinaciones de estas láminas forman los diferentes tipos de estructuras arcillosas que a su vez dan origen a paquetes de capas y que al combinarse conforman una placa de mineral arcilloso visible [4]. Otros constituyentes frecuentes en las arcillas, particularmente en las de baja calidad, son los carbonatos de calcio y magnesio. Cuando se encuentran disgregados en partículas finas se constituyen en fundentes energéticos. Así, durante la cocción de artículos elaborados con estas arcillas, a temperaturas por encima de

How to cite: Landinez, D., Calvo, M. and Cárdenas C. Caracterización de material arcilloso obtenido del río Guaviare, vereda de la paz, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, 44, pp. 31-37, Julio, 2018.

1000°C, se desarrolla una fase vítrea que puede provocar la deformación del material; a temperaturas menores, los carbonatos se manifiestan reduciendo la resistencia de la pieza [1]. Entre los constituyentes nocivos se encuentran la piritita (FeS_2) y el yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) que son fundentes energéticos durante la cocción a elevadas temperaturas (1200°C-1300°C). Otros constituyentes nocivos en las arcillas son las sales solubles, sulfatos y cloruros. Los sulfatos forman sales solubles que se depositan sobre los artículos de arcilla secos desmejorando el aspecto de estos.

Las fases orgánicas presentes en las arcillas influyen en las propiedades técnicas de las mismas, contribuyendo al aumento de la capacidad higroscópica en la arcilla y al incremento de la plasticidad y cohesión; por otra parte, la presencia de C (fase orgánica) en las arcillas origina durante la cocción un medio reductor que favorece una más temprana sinterización de esta materia prima [1].

Los elevados índices de sílice en las arcillas indican que éstas se hallan enarenadas o que su principal material arcilloso es la caolinita. El alto porcentaje de alúmina, que está muy próxima a la caolinita de composición teórica, hace prever la refractariedad del material. El contenido de óxidos colorantes como Fe_2O_3 y TiO_2 permite la aplicación de estas arcillas en la elaboración de artículos de tonalidad blanca, como porcelanas y lozas [1].

Las arcillas que contienen poca alúmina, y muchos óxidos alcalinos y alcalinotérreos, son de fácil fusión y se emplean en la elaboración de cerámicas para la construcción. Si el contenido de alúmina es alto se debe considerar la capacidad de la arcilla para sinterizarse sin perder su refractariedad y se pueden elaborar artículos refractarios y antiácidos altamente densos.

Existen muchas formas de clasificar las arcillas dependiendo del área de estudio. No existe una sola clasificación que involucre todas las características de las arcillas, se puede decir que se agrupan de acuerdo a su composición, génesis, utilización, etc.

En este trabajo se indican los resultados de la caracterización fisicoquímica realizada a las arcillas procedentes del río Guaviare, vereda de La Paz, departamento del Guaviare, Colombia

Para realizar esta caracterización se utilizó Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difracción de Rayos y Microscopía electrónica de barrido (SEM).

2. Materiales y métodos

La arcilla estudiada en el presente trabajo proviene del río Guaviare, el cual es un largo río de la Orinoquia colombiana que nace en la cordillera Oriental colombiana y desemboca en el Orinoco frente a San Fernando de Atabapo, Venezuela, y de Amanavén, Colombia, tal como se muestra en la Fig. 1. Se forma por la confluencia de los ríos Guayabero y el Ariari. tiene 1.497 km de longitud, de los cuales 630 km son navegables. De aguas color café claro que corren de occidente a oriente, su caudal permite el tránsito de embarcaciones de pequeño calado, más que nada de carga. Al nororiente del departamento del Guainía, recibe las aguas del río Inírida, cerca de la población de El Coco [9].



Figura 1. Mapa del departamento de Guaviare
Fuente: Adaptado de [3]



Figura 2. Arcilla del río Guaviare, vereda de la paz, departamento del Guaviare.
Fuente: Elaboración propia

La arcilla aquí analizada varía de color desde amarillos hasta rojizos y se encuentran conformadas principalmente por granos de tamaño arcilla con presencia de limos y arena. Para el desarrollo de este estudio, el grupo de investigación de geología GEGEMA suministró cerca de 400 gr de piedra de arcilla del Guaviare. La arcilla se muestra en la Fig. 2.

La piedra de arcilla se maceró con un mortero de ágata hasta obtener una arcilla con una granulometría inferior a un tamiz # 200. El resultado de la maceración se muestra en la Fig. 3. Del resultado anterior 50 gr de material fueron llevados a Fluorescencia de Rayos X (FRX), en esta técnica la muestra fue irradiada con fotones de una energía comprendida normalmente entre 6 y 120 keV, provenientes de un tubo de rayos X, capaz de proporcionar intensidades y energías diferentes con una emisión poli cromática continua, o bien en la emisión espontanea de ciertos radio núcleos. La radiación al incidir sobre la muestra provocó ionizaciones en los átomos del mismo, con el consiguiente relleno de vacantes acompañado de la emisión de rayos X. Estos rayos X son característicos de cada elemento, de manera que su detección permite la identificación de los elementos que componen la muestra.

Entre varias técnicas de caracterización de materiales, la técnica de difracción de rayos X es la más indicada para la determinación de fases cristalinas presentes en materiales cerámicos. Esto es posible porque en la mayor parte de los sólidos (cristales), los átomos se ordenan en planos cristalinos separados entre sí por distancias del mismo orden del ancho de la longitud de onda de los rayos X. Al incidir un haz de rayos x en un cristal, la interacción con los átomos presentes origina el fenómeno de difracción. La difracción de los rayos X ocurre según la ley de Bragg (Ecuación 1), la cual establece la relación entre el ángulo de difracción y la distancia entre los planos que se originan (característicos para cada fase cristalina):

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

Entre las ventajas de la técnica de difracción de rayos X para la caracterización de fases, se destacan la simplicidad y rapidez del método, la confiabilidad de los resultados obtenidos (pues el perfil de difracción obtenido es característico para cada fase cristalina), la posibilidad de análisis de materiales compuestos por una mezcla de fases y un análisis cuantitativa de estas fases.

Al caracterizar arcillas, la utilización de difracción de rayos X, se convierte en la técnica más indicada, puesto que un análisis químico reportaría los elementos presentes en el material más no la forma en que están enlazados. El análisis químico podría entonces ser asociado a un análisis racional, por ello los análisis obtenidos no representan una elevada confiabilidad.

En la caracterización de las arcillas, el alto contenido de cuarzo de la muestra y su facilidad de orientarse resultan en picos bien definidos y de gran intensidad. Perjudicando muchas veces la identificación y caracterización de las demás fases. En este trabajo esta descrito un procedimiento rápido y eficiente para identificar los minerales de arcilla. Este procedimiento minimiza la presencia de cuarzo y facilita la identificación de las demás fases.

Los ensayos de difracción fueron realizados en un difractor Panalytical –modelo XPERT MDR, con una velocidad del goniómetro de 1°/min, con un tubo de cobre de $\lambda = 1,523 \text{ \AA}$ [6].

El procedimiento para identificar arcillas por difracción de rayos X fue el siguiente, los materiales usados se muestran en la Fig. 3.

2.1. Procedimiento General [7,8]

1. Pesar 20 gr de arcilla seca y desglosarla en un mortero hasta un tamaño de partícula de menos de un tamiz # 200, como se muestra en la Fig. 4.
2. Suspender la arcilla desglosada en 200 ml de agua destilada.
3. Adicionar 5 ml de Hexametáfosfato de Sodio (dispersante).
4. Agitar la suspensión durante 20 min y colocar 5 min en baño ultrasónico.
5. Dejar la suspensión en reposo durante 25h.
6. Con ayuda de una pipeta retirar la suspensión fina evitando perturbación de la mesa o el material grueso depositado Fig. 5a.
7. Secar la fracción fina de la suspensión en un horno o estufa a 100°C y posteriormente desaglomerarla.

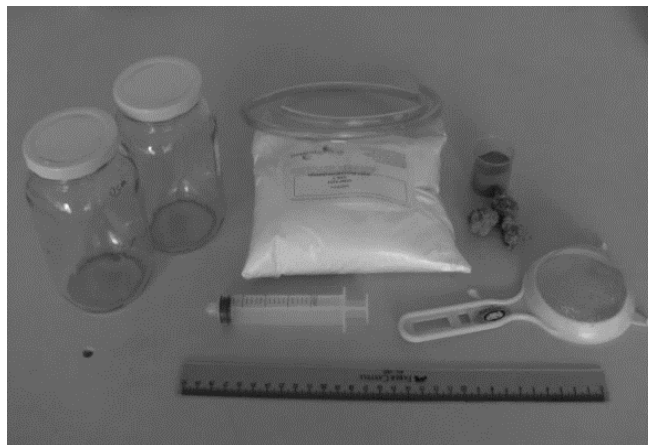


Figura 3. Materiales Utilizados en el procedimiento de maceración y decantación.

Fuente: Elaboración propia



Figura 4. Arcilla macerada con una granulometría inferior a un tamiz # 200.

Fuente: Elaboración propia

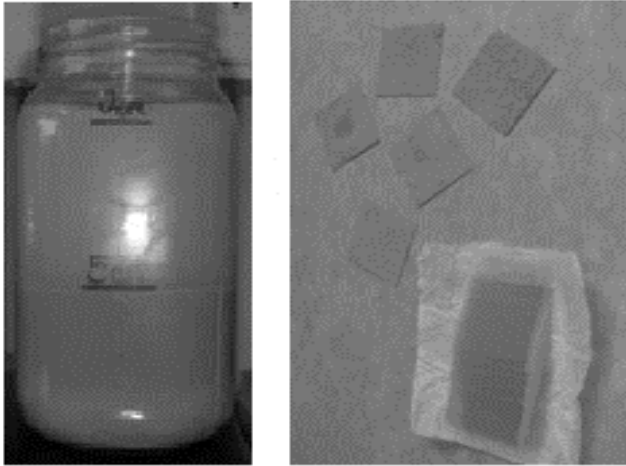


Figura 5. a) Fracción fina en suspensión; b). Láminas de vidrio con mineral de arcilla

Fuente: Elaboración propia

8. Preparar una suspensión de arcilla – agua con concentraciones de 60 gr de arcilla por 1 cm^3 de agua destilada
9. Retirar 3 ml de la suspensión y depositarla cuidadosamente sobre una lámina de vidrio (Las dimensiones de la lámina de vidrio deben ser compatibles con el porta muestras del difractor).
10. Secar la lámina en horno o estufa 100°C . (Fig. 5b).
11. Realizar los ensayos de difracción de rayos X, barriendo de 2 a 70° (escala 2θ) con una velocidad de $1^\circ/\text{min}$.

Después de la difracción de rayos X, las distancias interplanares (d) referentes a los picos presentados deberán ser comparadas con las distancias interplanares características de cada fase [6]. Muchas veces no es posible determinar con seguridad los minerales de arcilla presentes solo con la reflexión principal en esos casos se utilizan tratamientos con etilenglicol y/o calentamiento de la muestra que se describirán a continuación.

Existen dos tipos de tratamiento por este método: uno con vapor de etilenglicol y otro (método rápido) con gotas de etilenglicol directamente sobre la muestra (en este trabajo se hizo por el método rápido.)

Los líquidos orgánicos, principalmente etilenglicol y glicerol, se utilizan ampliamente como un tratamiento auxiliar para expandir arcillas (hincharlas), la cantidad de expansión puede proporcionar información complementaria para la identificación de la arcilla. Como un ejemplo de arcillas hinchables se encuentran la esmectita y la vermiculita [8].

Una posible desventaja con el método rápido es que presenta una mayor perturbación en la muestra encontrando como resultado en el espectro una mayor dispersión amorfa de los rayos X por el exceso de líquido.

2.2 Procedimiento con etilenglicol (método rápido)

1. Preparar la lámina siguiendo el procedimiento general.

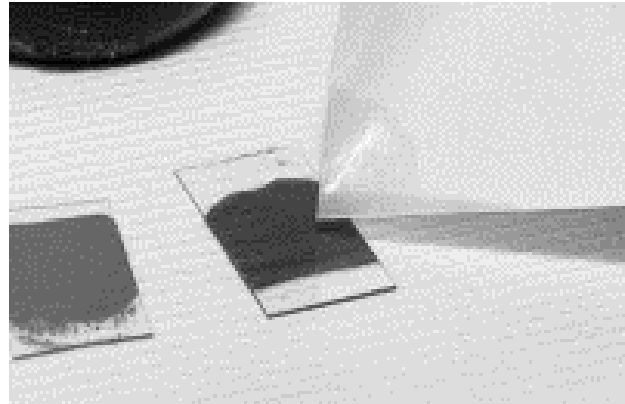
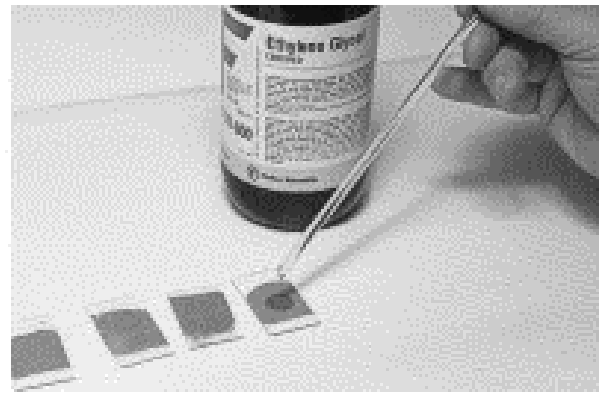


Figura 6. Procedimiento del método rápido con etilenglicol

Fuente: Elaboración propia

2. Aplicar en la lámina una o dos gotas de etilenglicol (Fig. 6).
3. Tan pronto como el líquido se observe de manera uniforme, el exceso de etilenglicol se remueve con papel de laboratorio y debe ser llevado directamente a difracción de rayos X.

2.3. Calentamiento de la muestra

(En este caso se busca eliminar las moléculas de agua absorbidas por los minerales de arcilla, resultando una disminución en la distancia interplanar referentes a la dirección (001) como ejemplo se tiene el pico principal de la Montmorillonita, que se desplaza 10 \AA . [8].

A continuación, se describen los pasos a seguir para realizar el calentamiento de la muestra:

1. Preparar la muestra siguiendo el procedimiento general.
2. Se coloca la lámina en una mufla, a una temperatura de 500°C y mantenerlo por 30 min.
3. Retirar la lámina de la mufla, y proceder al ensayo de difracción por rayos X barriendo de 2 a 70° (escala 2θ) con una velocidad de $1^\circ/\text{min}$.
4. Verificar el desplazamiento de los picos con el procedimiento con etilenglicol.

Para la caracterización de esta arcilla también se observó la morfología en el microscopio electrónico de barrido (SEM- FEI QUANTA 200), que consta de un cañón de electrones con su óptica, cámara de muestras, circuito de

vacío, electrónica de detección y registro de imagen. El cañón utiliza un filamento de tungsteno para generar el haz de electrones muy estrecho que barre la superficie de un material y permite obtener una representación ampliada de ésta. Utiliza el mismo principio óptico para formar imágenes a partir de un haz de electrones, lo que permite una gran profundidad de campo y resolución. En el SEM se requiere que la muestra sea conductora, como la arcilla no lo es, se realizó una metalización en un sputter SDC-050 de la Marca Balzers, en condiciones de prevacío (<10-1 torr) con Argón como gas de ataque (plasma) sobre una placa (ánodo) de Oro-Paladio (8:2), la película se deposita sobre las muestras (cátodo) a corriente de descarga de +/- 50mA y el espesor típico es de +/- 200 nm [10].

3. Resultados y discusión

La Tabla 1 presenta la composición química elemental obtenida por fluorescencia de rayos X (FRX).

Tabla 1.

Composición química de la arcilla caracterizada.

Nombre	Compuesto/Elemento	Composición %
Sílice	SiO_2	51,96
Titanio	TiO_2	1,20
Aluminio	Al_2O_3	21,74
Hierro	Fe_2O_3	14,51
Fósforo	P_2O_5	0,04
Magnesio	MgO	0,27
Potasio	K_2O	1,63
Sodio	Na_2O	0,13
Vanadio	V_2O_5	0,03
Zirconio	ZrO_2	0,05
Bario	BaO	0,04

Fuente: Elaboración propia

La Fig. 7 representa el difractograma, de una muestra de arcilla macerada a una granulometría inferior a un tamiz # 200. Está compuesta principalmente por cuarzo que en realidad es un material arenoso, se encontró también hematita, mineral que le confiere el color rojo a la arcilla.

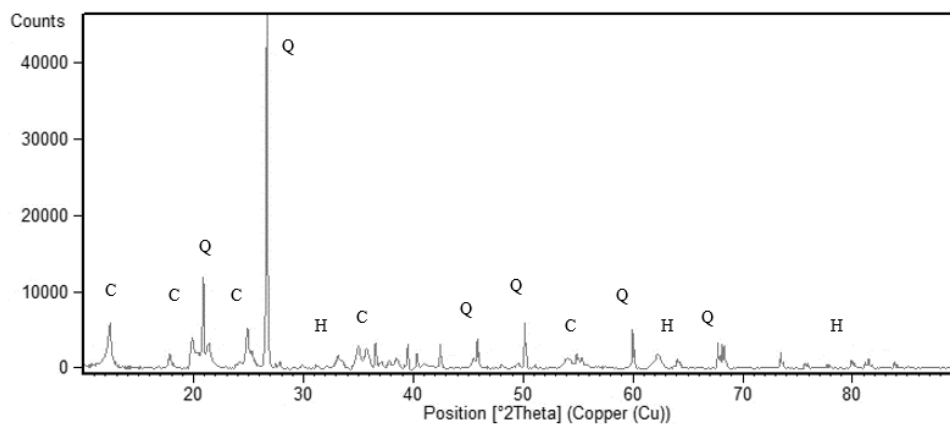


Figura 7. Difractograma de la arcilla del río Guaviare macerada y sin purificar mediante técnicas convencionales (incluyen separación mecánica y tratamientos químicos). Q: Cuarzo; C: Caolinita y H: Hematita. Fuente: Elaboración propia

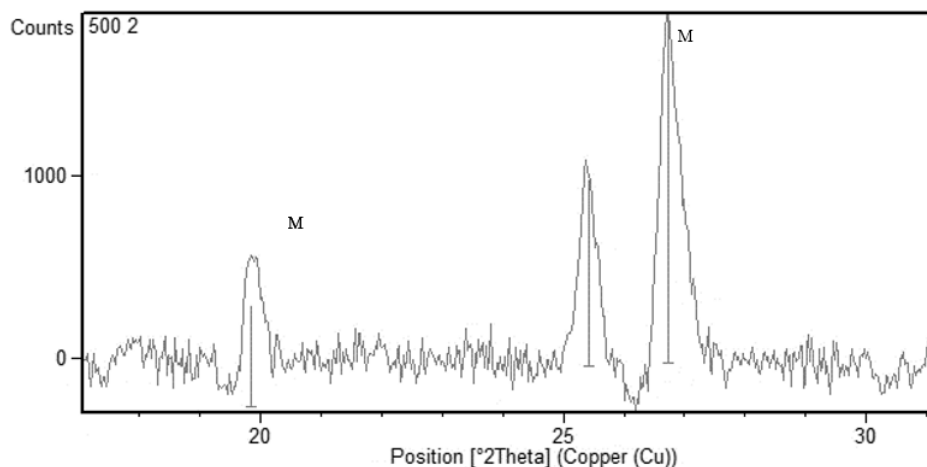


Figura 8. Difractograma de la arcilla del río Guaviare macerada y purificada mediante técnicas convencionales (incluyen separación mecánica). M: Montmorillonita. Fuente: Elaboración propia



Figura 9. Micrografías de la muestra
Fuente: Elaboración propia

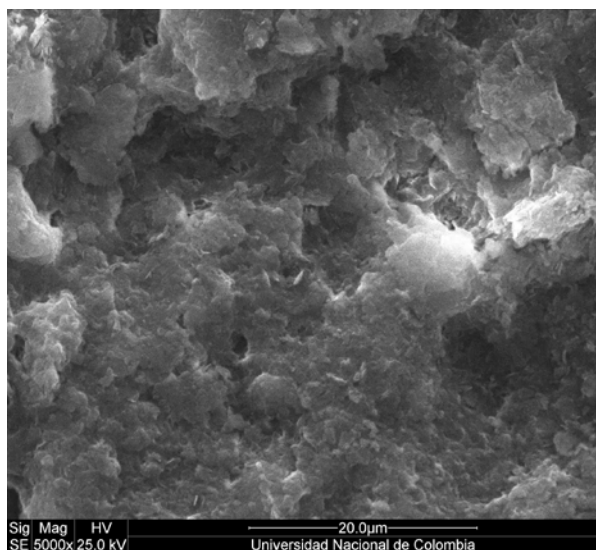


Figura 10. Apilamiento de las láminas de arcilla
Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 8 se muestra el difractograma de la arcilla tratada térmicamente a 500°C, obtenida de acuerdo con el procedimiento C.

Como se observa en las Figs. 9 y 10 (fotografías obtenidas con SEM), en las muestras existen conjuntos de placas de aproximadamente de 5 µm poniendo en evidencia la naturaleza laminar de la estructura de los aluminio-silicato.

4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos de este trabajo se puede concluir lo siguiente:

- Del análisis de FRX realizado a la muestra, se encontró que ellas tienen un alto contenido de Aluminio (mayor al 20%) y Silicio (mayor al 50%), con impurezas de Hierro,

Magnesio y Titanio principalmente, composición de interés tecnológico, principalmente para la obtención de material para construcción y pisos cerámicos.

- El procedimiento para identificar los minerales de arcilla por medio de difracción de rayos X propuesto en este trabajo permite una identificación rápida y confiable de los minerales de arcilla comúnmente presentes en los materiales arcillosos del país.

Recomendaciones

Teniendo en cuenta los problemas en el desarrollo de la investigación se recomienda realizar los procesos de:

- Tratamiento ácido acético para la eliminación de carbonatos antes de la decantación.
- Tratamiento con peróxido de hidrógeno para la eliminación de sustancias orgánicas antes de la decantación.
- Para la determinación de fases por tratamiento con etilenglicol, se sugiere realizarlo por el método de evaporación que presenta una menor perturbación en la muestra y por consiguiente un espectro con una menor dispersión amorfa de los rayos X.
 - Posicionar la lámina sobre un soporte dentro de un recipiente y adicionar 100 ml de etilenglicol en el fondo del recipiente, impidiendo el contacto directo del agente con la lámina
 - Tapar el recipiente y colocarlo en una estufa a 90° C durante 5 h.
 - Retirar la lámina de la estufa y el ensayo de difracción deberá ser realizado en un máximo de una hora.
- En el tratamiento con calentamiento, se sugiere calentar la muestra durante 2 horas como mínimo a 500° C. En busca de eliminar las moléculas de agua absorbidas por los minerales de arcillas.
- Para poder observar mejor la estructura característica de las fases de los minerales de arcilla se recomienda tomar micrografías con el microscopio electrónico de transmisión (TEM).

Referencias

- [1] Avgustinik, A.I., Cerámica. Editorial Reverté, S.A. Argentina, Buenos Aires, 1983.
- [2] Bernal, I., Cabezas, H., Espitia, C., Mojica, J. y Quintero, J., Análisis próximo de arcillas para cerámica. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 27, pp. 569-578, 2003.
- [3] Wikipedia. Río Guaviare. [en línea] Disponible en: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/09/Guaviariveremap.png>
- [4] García-Romero, E. y Suárez-Barrios, M., Las arcillas: propiedades y usos. [en línea]. ed. 1. Madrid: Julio 2005 [ref. de 10 de febrero de 2006]. Disponible en: <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/MarcoNuevo.htm>
- [5] Neves, L.E., Estudio práctico de argilas por difratometría de rayos X – Boletim Técnico da Petrobrás 11(1), pp. 123-135, 1968.
- [6] Panalytical., Malvern Panalytical, [en línea]. 2015. Disponible en: <http://www.panalytical.com/Xraydiffractometers.htm>
- [7] Santos, P.S., Ciência e tecnologia de argilas, v. 1. ed. Edgard Blücher Ltd., 1989.

- [8] Santos, P.S., *Ciência e tecnologia de argilas*, v. 2. ed. Edgard Blücher Ltd., 1989.
- [9] *Toda Colombia*, [e línea]. 2005. Colombia. Disponible en: <http://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/guaviare.html>
- [10] Universidad Nacional de Colombia., *Laboratorios*, [en línea]. 2015, Disponible en: <http://www.laboratorios.bogota.unal.edu.co/vercontenido.php?idc=37>
- D.A. Landinez**, recibe el título de Físico de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, en 1991, MSc. en Física de la Fundação Universidade de Brasília, Brasil, en 1994 y Dr. en Universidade Federal De Pernambuco, Brasil, en 1999. Es docente de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá desde el año 2000.
ORCID: 0000-0001-7108-617X
- M.P. Calvo**, es Lic. en Física de la Universidad Pedagógica Nacional en el 2011, MSc. en Ingeniería de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia en el 2016. Es docente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas desde el año 2013.
ORCID: 0000-0002-7909-6740
- D.C. Cárdenas**, es Ing. Aeronáutica de la Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, en 2011, MSc. en Ingeniería de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia en el 2015.
ORCID: 0000-0001-7737-7015

Incorporation of random uncertainty of soil properties in geostatistic analysis. Application to the reliability design of shallow foundations

Maddy Alejandra Munévar-Peña ^a, Alfonso Mariano Ramos-Cañón ^b & Luis Felipe Prada-Sarmiento ^a

^a Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. maddy_munevar@javeriana.edu.co, lf.pradas@javeriana.edu.co

^b Instituto Geofísico, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. a-ramos@javeriana.edu.co

Received: December 11th, 2017. Received in revised form: April 06th, 2018. Accepted: May 06th, 2018.

Abstract

This research tackles the usual lack of certainty in the definition of soil properties for the design of geotechnical projects. A novel procedure is proposed to incorporate random local uncertainty of soil properties in geostatistics analysis aimed at estimating values of parameters in zones without physical information like borings. Real values measured from samples obtained in local borings are considered as deterministic data, and are fed to the geostatistics model. However, measurements taken from two close borings may show different values, which indicate the natural inherent variation of soil properties. A modification to conventional geostatistics is presented to consider the random local uncertainty observed in geotechnical parameters. Both standard and modified procedures are applied to the reliability based design of a shallow footing.

Keywords: natural variability; uncertainty in the soil properties; interpolation of regionalized variables; geostatistics in geotechnical engineering; reliability design.

Incorporación de la incertidumbre aleatoria de las propiedades del suelo en la geoestadística. Aplicación al diseño de cimentaciones basado en confiabilidad

Resumen

Este trabajo aborda la falta de certeza en la estimación de las propiedades del suelo con las cuales se diseñan estructuras geotécnicas. Se propone un procedimiento para incorporar la incertidumbre aleatoria puntual de las propiedades del suelo en los procesos geoestadísticos que se utilizan para estimar valores de variables geotécnicas en localizaciones no muestreadas. Para hacer uso de dichos procesos geoestadísticos es necesario tener valores medidos en perforaciones puntualmente localizadas que se deben considerar deterministas y representativos de un tipo de suelo, sin embargo, al realizar dos mediciones en puntos muy cercanos existen diferencias dadas por la variabilidad natural inherente de las propiedades del suelo. Este trabajo propone una modificación al procedimiento geoestadístico convencional para tener en cuenta la incertidumbre aleatoria puntual de las variables geotécnicas. Se aplicó el procedimiento convencional y modificado al diseño basado en confiabilidad de una cimentación superficial.

Palabras clave: variabilidad natural; incertidumbre de las propiedades del suelo; interpolación de variables regionalizadas; geoestadística en geotecnia; diseño basado en confiabilidad.

1. Introducción

La estimación de las propiedades y parámetros del suelo es una de las principales actividades en el diseño de estructuras geotécnicas, usualmente se hace a partir de valores obtenidos de ensayos de laboratorio realizados a muestras de suelo extraídas de perforaciones puntualmente

localizadas. Una vez que se tiene la información de las diferentes columnas de suelo en un área determinada, se hace uso de la experticia del geotecnista o de herramientas de interpolación como la geoestadística para estimar valores de las propiedades del suelo en las zonas no exploradas y generar el perfil de suelos homogéneos. En el proceso de interpolación con geoestadística convencional es necesario

How to cite: Munévar, M.A., Mariano-Ramos, A. and Prada, L.F., Incorporación de la incertidumbre aleatoria de las propiedades del suelo en la geoestadística. Aplicación al diseño de cimentaciones basado en confiabilidad. Boletín de Ciencias de la Tierra, 44, pp. 38-48, Julio, 2018.

suponer que existe certeza de los valores de las propiedades del suelo (varianza cero en el punto muestreado) y a partir de estos se genera el perfil de suelos en el que se supone homogeneidad. Esto se refleja en dificultades para modelar efectos inducidos por la variabilidad natural del suelo como asentamientos diferenciales [13]. Lo anterior se refleja cuando se realizan dos mediciones de la misma propiedad en puntos muy cercanos y el resultado difiere, dando cuenta de una magnitud de incertidumbre que depende de la distancia de separación de dichos puntos cercanos.

Las diferentes especialidades de las geo-ciencias tienen diferentes fuentes de incertidumbre, entre las que se encuentran la incertidumbre aleatoria relacionada con la aleatoriedad inherente de los procesos naturales y la incertidumbre epistémica que se refiere al conocimiento limitado, es decir carencia de datos o ausencia de información [8]. En este caso se aborda el problema desde la variabilidad natural espacial de las propiedades de los diferentes materiales que componen el subsuelo.

La caracterización de la incertidumbre en geotecnia requiere la utilización de diferentes herramientas como la geoestadística para estimar el valor de las propiedades geotécnicas donde no están disponibles directamente [11,14]. De acuerdo con Soltani, [18] la geoestadística se encuentra dentro de los procesos más comúnmente utilizados para la estimación de valores de propiedades del suelo, debido a que utiliza el método de estimación óptimo llamado krigado. El krigado garantiza la mínima varianza del error de la predicción por lo que es considerado el mejor predictor insesgado [5] y cumple con las mejores condiciones que estadísticamente se le pueden pedir a un estimador, ya que asegura que la media de la predicción sea igual a la media de los valores observados [7].

Una de las características importantes del uso del krigado para la estimación de las propiedades geotécnicas del suelo, es que para su aplicación se requiere que los datos de entrada sean considerados libres de incertidumbre, es decir que se debe suponer certeza del valor puntual tomado de una muestra, sin dar lugar a las variaciones debidas a las condiciones naturales de formación [18].

Soltani y Safa [19] desarrollaron en 2016 una herramienta en Matlab para la aplicación del proceso geoestadístico a datos difusos llamada FuzzyKrig. Argumentan que las mediciones de una variable contienen una magnitud de incertidumbre que es propagada a lo largo del proceso geoestadístico. La motivación del trabajo de Soltani y Safa [19] fue poder trabajar con datos no exactos mediante métodos difusos de krigado partiendo de la limitación del proceso convencional de la geoestadística donde los datos de entrada se deben suponer que son ciertos. En este trabajo se adopta la misma motivación de Soltani y Safa [19], sin embargo, se plantea una solución alternativa a la limitación del proceso convencional de la geoestadística utilizando la teoría de la probabilidad.

De acuerdo con Dubost, 2011 [4] si se contabilizan adecuadamente las incertidumbres geotécnicas y sus efectos sobre las respuestas del suelo, es posible comprender y modelar mejor un problema geotécnico. En este trabajo se

propone una alternativa para involucrar la incertidumbre aleatoria debida a la variabilidad natural de los suelos en el proceso geoestadístico con el fin de propagarla hasta los resultados. Se utilizaron como datos de entrada al proceso geoestadístico el primer y segundo momento estadístico de las variables resistencia al corte no drenada y el peso unitario total del suelo y se obtuvieron sus áreas de predicción con su respectiva incertidumbre propagada. Se aplicaron los resultados al diseño basado en confiabilidad de una cimentación superficial por capacidad portante en condición no drenada, para determinar la influencia de la incertidumbre aleatoria puntual de las propiedades evaluadas.

Realizado el análisis se encontró que cuando no se tiene en cuenta la incertidumbre aleatoria puntual de las propiedades del suelo, el diseño es conservador ya que la cimentación requiere menores dimensiones para satisfacer un determinado índice de confiabilidad o una determinada probabilidad de falla.

El proceso metodológico seguido para el desarrollo del trabajo se dividió en tres fases, la primera comprende el procedimiento propuesto para la incorporación de la incertidumbre aleatoria puntual en el proceso geoestadístico, lo que condujo a una modificación del procedimiento convencional. La segunda correspondió a la aplicación de la geoestadística convencional y modificada a la información geotécnica recopilada para el proyecto de la primera línea del metro de Bogotá. Finalmente se utilizaron los resultados obtenidos de la aplicación convencional y modificada de la geoestadística como datos de entrada para dos diseños basados en confiabilidad de una cimentación superficial, uno con los resultados de la geoestadística convencional y el otro con los de la modificada.

2. Geoestadística convencional

En la geoestadística convencional, los valores de la variable a interpolar se suponen libres de incertidumbre, es decir, se asigna un único valor a la propiedad de un tipo de suelo sin considerar que ésta puede tomar diferentes valores dada su variabilidad natural. En el caso de variables geotécnicas, al tomar distintas mediciones en un mismo tipo de suelo se presentan diferencias en sus valores debido a su variabilidad natural inherente llamada en este documento incertidumbre aleatoria puntual. Por tal razón, se propone incluir la incertidumbre aleatoria puntual en el procedimiento geoestadístico convencional, lo que conlleva a una modificación del mismo.

El primer paso para el análisis geoestadístico es la determinación de la estructura espacial de los datos mediante la función del variograma (Ecu. 1), donde a partir de los valores muestreados de una variable se obtiene su variación con respecto a las distancias de separación entre las ubicaciones de las mediciones.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i + h) - Z(x_i)] \quad (1)$$

$\gamma(h)$ es la variación de la variable con respecto a la distancia de separación entre las localizaciones muestreadas, $Z(x_i)$ es el valor de la variable medido en una ubicación x_i , $Z(x_i + h)$ es el valor de la variable observado en una localización $(x_i + h)$, h es el vector que denota distancia de separación entre las localizaciones de las mediciones y N es el número de pares $Z(x_i)$ y $Z(x_i + h)$ separados una distancia h [12].

La función del variograma se basa en el principio de que, a menor distancia de separación entre dos mediciones sus propiedades serán más parecidas que en el caso en el cual estos puntos se encuentran separados una distancia mayor [16]. La representación gráfica de la función del variograma es una nube de puntos que corresponde a la variación de la variable para cada una de las distancias de separación entre las localizaciones muestreadas. Este variograma es llamado empírico. Para la aplicación del proceso geoestadístico es necesario tener la variación de la variable para cualquier distancia de separación posible, por lo tanto, el variograma empírico calculado para distancias particulares se debe ajustar a una función continua llamada variograma teórico [5]. En la Fig.1 se muestra la representación del variograma empírico que corresponde a la nube de puntos y el variograma teórico que es la función que se ajusta a dichos puntos.

El variograma teórico se caracteriza por tres parámetros (Fig.1), la longitud de correlación (alcance) que representa la máxima distancia de separación entre las muestras para la cual la variable está correlacionada; el umbral que es el valor del variograma para la longitud de correlación [16]; y el efecto pepita que corresponde al valor del variograma para distancias de separación entre las muestras iguales a cero ($h=0$) [5].

Una vez definido el variograma teórico que representa la estructura espacial de los datos, el siguiente paso del proceso geoestadístico es la estimación de la variable en una localización no muestreada, lo que se realiza aplicando el método del krigado (Ecu. 2).

Donde $Z(x_p)$ corresponde a la estimación de la variable en una ubicación no muestreada x_p , $Z(x_i)$ son los valores de la variable en las ubicaciones muestreadas x_i y W_i son las ponderaciones que se obtienen de la estructura espacial de los datos, es decir que los W_i son calculados mediante el variograma teórico por el método de multiplicadores de Lagrange [5, 12].

$$Z(x_p) = \sum_{i=1}^N W_i * Z(x_i) \quad (2)$$

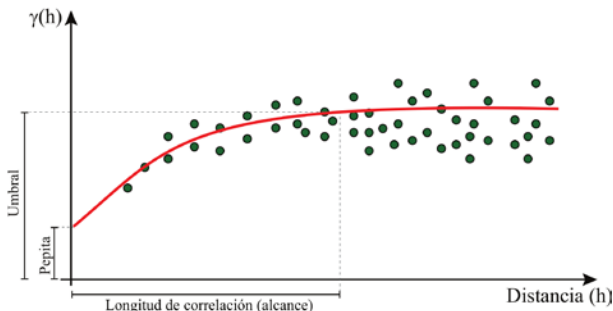


Figura 1. Variograma empírico y teórico
Fuente: Los autores

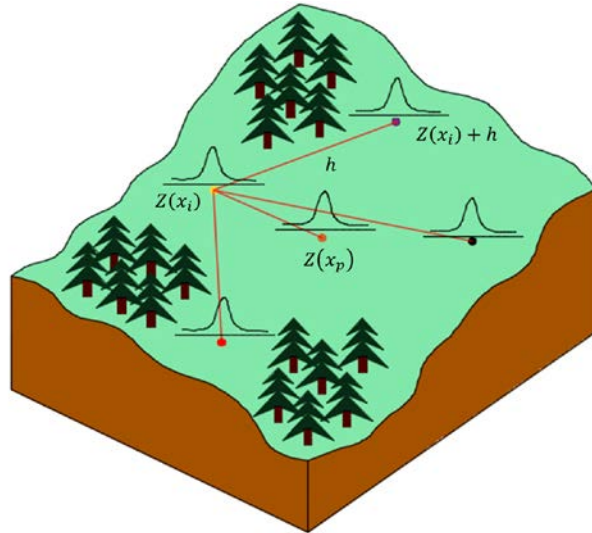


Figura 2. Bloque diagrama de la propuesta de modificación.
Fuente: Los autores

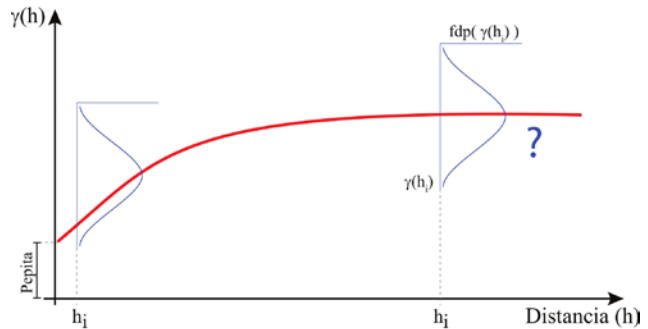


Figura 3. Propuesta de modificación del proceso de geoestadística basada en la incorporación de la incertidumbre puntual en el variograma incluyendo el existente considerando el efecto pepita.
Fuente: Los autores.

3. Modificación de la geoestadística

La propuesta para la incorporación de la incertidumbre aleatoria puntual, consiste en que en lugar de suponer deterministas los valores medidos se tenga en cuenta que estos siguen una función de densidad de probabilidad (Fig. 2).

El proceso convencional de la geoestadística considera el efecto pepita como una diferencia determinista asociada en el origen, sin embargo, no considera que existe variabilidad en la diferencia de valores de las propiedades en función de la distancia de separación. Dado que se conoce que existe variabilidad natural en las propiedades del suelo, la diferencia de sus valores no siempre es la misma dada la distancia de separación de los puntos muestreados, por lo que, tanto el efecto pepita como el variograma no deberían ser deterministas (Fig. 3). En este trabajo se consideraron los momentos estadísticos de las variables de entrada para dar cuenta de la incertidumbre dada por la variabilidad natural, lo que permitió encontrar la incertidumbre del variograma para diferentes distancias de separación entre dos puntos.

Se propone suponer que en la Ecu. (1) $Z(x_i)$ y $Z(x_i + h)$ están caracterizados por su primer y segundo momento estadístico, para que una vez aplicada la función variograma (Ecu. 1) el resultado siga también una función de densidad de probabilidad caracterizada por sus dos primeros momentos estadísticos.

Si se suponen aleatorias las variables a interpolar, los valores de entrada del análisis geoestadístico ya no serán únicamente los valores medidos, sino que también se tendrá en cuenta su incertidumbre aleatoria puntual. Se considera que la variable sigue una función de densidad de probabilidad donde el valor medido en una ubicación $Z(x_i)$, es considerado como el primer momento estadístico y el segundo momento estadístico es calculado para el grupo de mediciones en diferentes localizaciones.

Uno de los pasos de la modificación del procedimiento geoestadístico convencional para incluir la incertidumbre aleatoria puntual de la variable a interpolar, es encontrar el segundo momento estadístico del variograma teniendo en cuenta los dos primeros momentos estadísticos de los datos de entrada. Para esto se propone utilizar el método de evaluación por confiabilidad de Primer Orden Segundo Momento. En este caso particular la función evaluada es el variograma ya que depende de la variable a interpolar que se quiere considerar aleatoria. Los resultados de la aplicación de éste método están dados por los dos primeros momentos estadísticos de la función.

Para el cálculo del valor esperado de la función según el método de Primer Orden Segundo Momento el valor esperado se describe mediante la Ecu. (3). En este caso el valor esperado del variograma sería la aplicación de Ecu. (1) de manera convencional. Por otro lado, el cálculo de la desviación estándar se realiza mediante la aplicación de Ecu. (4). [6]

$$E[f(x_i)] \approx f(\mu_{x_i}) \tag{3}$$

$$\text{Var}[f(x_i)] \approx \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \Big|_{\bar{x}} \text{Var}(x_i) \tag{4}$$

La Ecu. (4) aplicada al caso particular donde la función es el variograma y depende de una sola variable que es la que se quiere interpolar, se representa en la Ecu. (5), donde x representa la variable a interpolar.

$$\sigma^2_{\gamma(h)} = \sigma^2_x \left(\frac{\partial \gamma(h)}{\partial x} \right)^2 \tag{5}$$

Sustituyendo la Ecu. (1) en la Ecu. (5) se obtiene la Ecu. (9) con la que se puede calcular el segundo momento estadístico del variograma, que representa la incertidumbre propagada de la variable aleatoria a interpolar. Una vez que se tienen todos los términos de la ecuación se aplica la modificación a cada uno de los puntos del variograma empírico para encontrar su desviación estándar.

$$\sigma^2_{\gamma(h)} = \sigma^2_x \left[\frac{2 \sum_{i=1}^N [Z(x_i + h) - Z(x_i)]}{2N} \left(\frac{\partial Z(x_i + h)}{\partial Z(x_i)} - \frac{\partial Z(x_i)}{\partial Z(x_i)} \right) \right]^2 \tag{6}$$

$$\sigma^2_{\gamma(h)} = \sigma^2_x \left[\frac{\sum_{i=1}^N [Z(x_i + h) - Z(x_i)]}{N} \right]^2 \left[\frac{\partial Z(x_i + h) - \partial Z(x_i)}{\partial Z(x_i)} \right]^2 \tag{7}$$

$$\sigma^2_{\gamma(h)} = \sigma^2_x \left[\frac{2 \gamma(h)}{N} \right] \left[\frac{\partial Z(x_i + h) - \partial Z(x_i)}{\partial Z(x_i)} \right]^2 \tag{8}$$

$$\sigma_{\gamma(h)} = \sqrt{\underbrace{\sigma^2_x}_{\text{Parte 1}} \underbrace{\left[\frac{2 \gamma(h)}{N} \right]}_{\text{Parte 2}} \underbrace{\left[\frac{\partial Z(x_i + h) - \partial Z(x_i)}{\partial Z(x_i)} \right]^2}_{\text{Parte 3}}} \tag{9}$$

Conocida la incertidumbre del variograma representada por su segundo momento estadístico, se debe incorporar en el procedimiento tradicional de forma tal que se refleje en la estimación de la variable en una localización no muestreada.

El siguiente paso del proceso convencional de la geoestadística tiene que ver con la estimación de la variable de interés en una localización no muestreada, a partir de la estructura espacial de los datos dada por el variograma teórico [5]. De acuerdo con la teoría de la interpolación espacial de variables regionalizadas, una vez se tiene el variograma empírico éste debe ser ajustado a un modelo teórico. En este caso se tienen los dos primeros momentos estadísticos del variograma por lo que es necesario modificar el procedimiento, con el fin de obtener la estructura espacial de los datos que represente dicha situación. [5].

Para esta actividad se utilizó otro método para análisis de confiabilidad llamado Estimación puntual, que proporciona aproximaciones de la función $f(x)$ a partir de momentos de bajo orden de una variable x . Mediante la aplicación del método de cuadratura de Gauss se ubican las coordenadas de los puntos óptimos para evaluar los momentos de la función de densidad de probabilidad para cada variable aleatoria. Los puntos óptimos son llamados estimativos puntuales. Rosenblueth propone que en el caso donde la variable aleatoria x sea simétrica y aproximadamente gaussiana ésta puede ser estimada en dos o más puntos. Si se utilizan dos puntos, éstos corresponden al valor de la variable x_i una desviación estándar por encima y una por debajo de su media [2].

En este caso particular se propuso suponer la función krigeado (Ecu. 2) como $f(x)$ que depende del variograma. Los estimativos puntuales corresponderán a la evaluación de la función Ecu. (2) en dos puntos óptimos, que serán el variograma empírico una desviación estándar por encima y una por debajo. La variable aleatoria ahora corresponde al variograma y la función que depende de ella es el krigeado.

De acuerdo con el procedimiento los variogramas empíricos deben ser ajustados a un modelo teórico para la aplicación de la función krigeado (Ver Fig. 4).

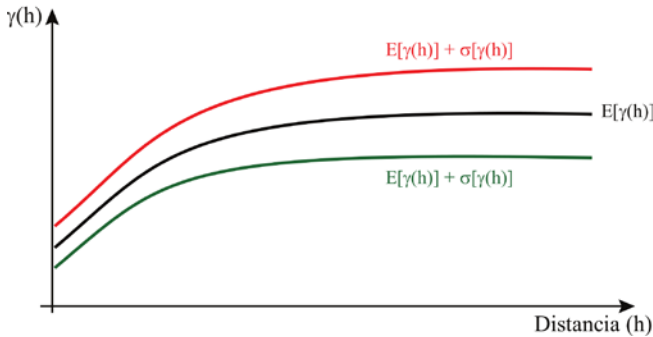


Figura 4. Esquema de variogramas teóricos convencional y modificados que se obtienen con la aplicación del procedimiento propuesto.
Fuente: Los autores

Como en este caso se tienen dos variogramas teóricos obtenidos aplicando el método de Estimación puntual, el procedimiento a seguir es hacer el krigado de manera convencional e independiente para cada variograma teórico obteniendo así la estimación + y - en una localización no muestreada, lo que correspondería a la evaluación de la función en los dos puntos óptimos cuando se tiene una sola variable.

Teniendo en cuenta que la técnica krigado además de estimar el valor de la variable en una localización no muestreada, también calcula la varianza de la estimación, en este caso se tendrían dos parejas $\mu^+_{Zx_p}, \sigma^+_{Zx_p}$ y $\mu^-_{Zx_p}, \sigma^-_{Zx_p}$ de tal forma que se aplica Ecu. (10) para el cálculo de la media y desviación de la estimación con el procedimiento modificado. Lo anterior se realiza bajo la consideración de la varianza de la estimación como una variable aleatoria obtenida con las realizaciones de la función Krigado, por lo tanto, su valor medio también es calculado aplicando ecu. (10).

$$E[f(x_i)] = P_i f(\mu_{x_i} \pm \sigma_{x_i}) \quad (10)$$

$$P_+ = P_- = \frac{1}{2} \quad (11)$$

Donde $f(\mu_{x_i} \pm \sigma_{x_i})$ es la función de desempeño evaluada en dos puntos óptimos y P_i son los pesos del estimativo que para el caso de una sola variable corresponde a $\frac{1}{2}$ (Ver Ecu. 11) [2].

4. Aplicación

Para la aplicación de la propuesta de modificación se utilizó la información geotécnica levantada por el Consorcio L1 contratado por la Alcaldía de Bogotá (Colombia) para el proyecto “Primera línea del metro de Bogotá, PLMB”. El Consorcio L1 dividió el trazado de la primera línea del metro en 4 tramos y para éste trabajo se utilizó la información correspondiente al tramo 3 localizado en la carrera décima desde la calle 12 hasta la calle 67 de la ciudad de Bogotá, tramo que a lo largo del documento será llamado tramo de

estudio (Ver Fig.5). La información fue descargada de la página web del Instituto de Desarrollo Urbano, 2015 [9].

El tramo de estudio fue proyectado por el Consorcio L1 con una longitud de 6171 m en el que realizó 80 perforaciones hasta de aproximadamente 50 m de profundidad. Las perforaciones se encuentran separadas de forma irregular entre 100 y 150 m dada la interferencia de predios y redes de servicios públicos. De cada perforación, el Consorcio L1 extrajo en promedio 25 muestras a las que realizó ensayos en la mayoría correspondientes a pesos unitarios, límites de atterberg, granulometría y humedades, seguido de al menos dos ensayos de compresión simple y en algunos casos un triaxial por perforación.

Es importante mencionar que para la realización de éste trabajo se utilizaron los resultados de los ensayos reportados por el Consorcio L1 en la página del web del Instituto de Desarrollo Urbano, 2015 [9].

Una vez recopilada la información fue necesario realizar la clasificación de las muestras utilizando el “Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS” [1] además de georreferenciarlas en planta y en profundidad. Con el fin de determinar horizontes homogéneos para el análisis geoestadístico se elaboró el perfil de suelos de manera convencional, teniendo en cuenta únicamente la información de las muestras clasificadas en profundidad y la experiencia del geotecnista.

En el perfil de suelos se identificó un horizonte de arcilla de baja plasticidad de profundidad entre 8 y 20 metros, con longitud aproximada de 2400 metros de los 6171 del tramo de estudio. Sobre dicho perfil se propuso emplazar una cimentación superficial y evaluar dos diseños basados en confiabilidad. Uno de los diseños con los resultados de la estimación de parámetros con el procedimiento convencional y el otro con los resultados de la estimación de parámetros con el procedimiento que incluye la incertidumbre aleatoria puntual.

Se procedió a filtrar la información geotécnica propia del horizonte de arcilla de baja plasticidad, de lo que se concluyó que la mayoría resultados que se reportaron fueron de resistencia al corte no drenada y peso unitario total del suelo, variables con las que es posible realizar un análisis de capacidad

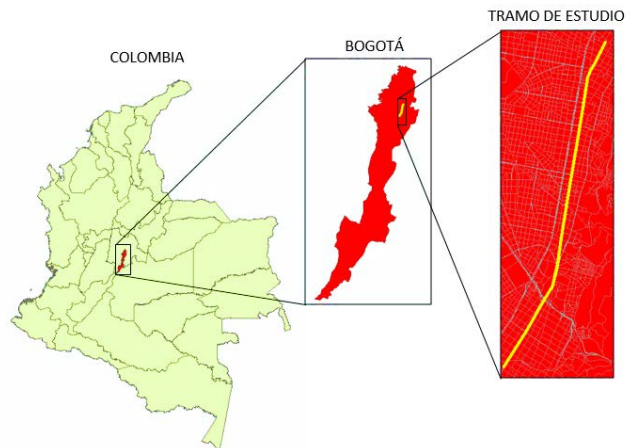


Figura 5. Localización de la zona de aplicación del procedimiento.
Fuente: Los autores

Tabla 1. Estadísticos de las variables geotécnicas procesadas.

Estadísticos	S_u (kPa)	γ (kN/m ³)
Media	37.07	20.62
Desviación estándar	13.09	2.42
Varianza	171.32	5.87
COV (%)	39.00	12.00

Fuente: Los autores

portante de una cimentación superficial en condición no drenada. Cabe resaltar que luego del filtro de la información, la cantidad de datos disponibles para el ejercicio fue de aproximadamente 30 datos por variable. En la Tabla 1 se muestran los estadísticos de las variables geotécnicas procesadas.

De acuerdo con la información disponible se consideraron la resistencia al corte no drenada S_u y el peso unitario total γ como variables en el análisis geoestadístico y además como variables aleatorias en el análisis de confiabilidad, por tal razón fue de gran importancia conocer la función de densidad de probabilidad teórica a la cual se ajustan.

Para conocer la distribución que siguen las variables que se consideraron aleatorias, se realizó una prueba de bondad de ajuste. Esta se refiere a una prueba de hipótesis estadística que busca conocer la forma funcional de la distribución muestreada comparando las frecuencias observadas de la muestra con las frecuencias esperadas si la variable se distribuye de acuerdo con una función teórica [3]. Se utilizó la prueba de Kolmogorov Smirnov utilizada usualmente para muestras de tamaño pequeño (Figs. 6, 7). De lo anterior se obtuvo que para las dos variables que se consideraron aleatorias, se aceptan las diferentes funciones de densidad de probabilidad teóricas evaluadas con un nivel de confianza del 95 %. En la Tabla 2 se presentan los resultados de la prueba para el peso unitario, en donde se aceptan las funciones teóricas Normal y Log-Normal. En la Tabla 3 se presentan los resultados de la prueba para la resistencia al corte no drenada en donde se aceptan las funciones teóricas Normal, Log-Normal y Beta. (Figs. 6, 7).

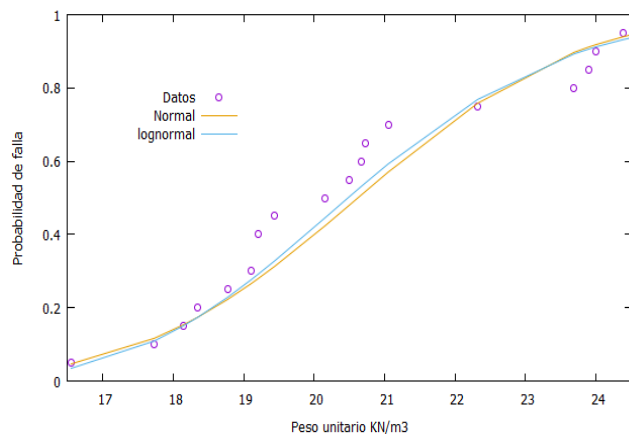


Figura 6. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov para el peso unitario de la arcilla de baja plasticidad. Fuente: Los autores

Tabla 2. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov para el peso unitario de la arcilla de baja plasticidad.

	Normal	Log - Normal
Diferencia máxima	0.1370	0.1218
Estimador KS Conf. 95%	0.3041	0.3041
Prueba	Se acepta	Se acepta

Fuente: Los autores

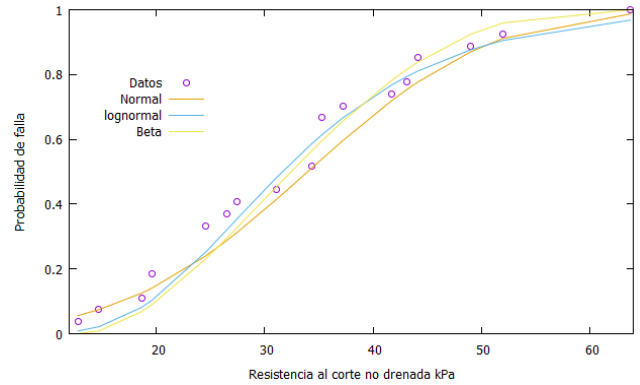


Figura 7. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov para la resistencia al corte no drenada de la arcilla de baja plasticidad. Fuente: Los autores

Tabla 3. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov para la resistencia al corte no drenada de la arcilla de baja plasticidad.

	Normal	Log - Normal	Beta
Diferencia máxima	0.1268	0.0823	0.1036
Estimador KS Conf. 95%	0.2617	0.2617	0.2617
Prueba	Se acepta	Se acepta	Se acepta

Fuente: Los autores

Definidas las variables y sus funciones de densidad de probabilidad se aplicaron los dos procedimientos geoestadísticos. El procedimiento de manera convencional fue aplicado a cada variable como se explicó en el numeral 2. Mediante la aplicación de la Ecu. (1) se encontró la estructura espacial de los datos. En la Fig. 8 se presenta a manera de ejemplo el variograma empírico y teórico obtenido para la variable peso unitario mediante el proceso convencional de la geoestadística.

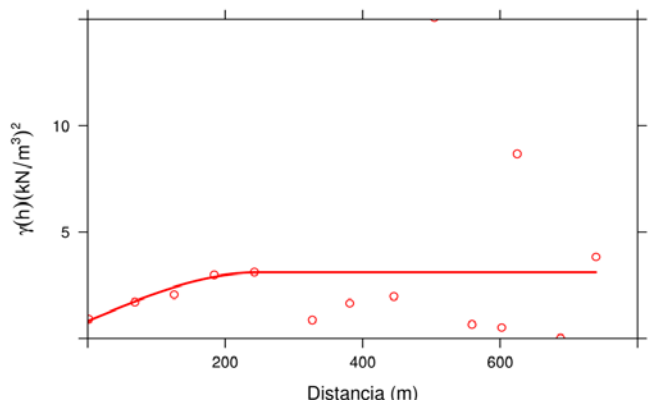


Figura 8. Variograma empírico y teórico del peso unitario, obtenido con el proceso convencional de la geoestadística. Fuente: Los autores

Tabla 4.

Parámetros de los variogramas teóricos para cada variable, obtenidos mediante la aplicación del proceso convencional de la geostatística.

Parámetros	Su (kPa)	γ (kN/m ³)
Alcance	74.82	228.79
Umbral	248.93	3.07
Pepita	190.12	0.80
Modelo	Esférico	Esférico

Fuente: Los autores

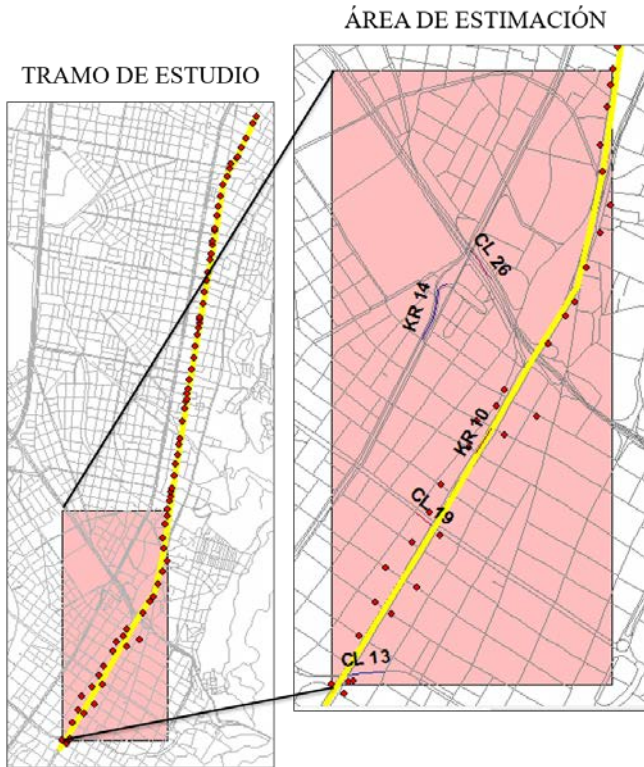


Figura 9. Localización del área de estimación
Fuente: Los autores

Dado que la información disponible no permite encontrar la estructura espacial de los datos segmentados por direcciones, fue necesario suponer los variogramas omnidireccionales, aplicables a toda el área de estudio. Los parámetros de los variogramas teóricos obtenidos para cada variable mediante la aplicación de la geostatística convencional, se pueden observar en la Tabla 4.

Con la aplicación de la Ecu. (2) se estimó el valor de la variable en un área de 2 km² cada 5 metros alrededor del alineamiento. El área de estimación se localizó a lo largo de la carrera 10 entre las calles 13 y 33, con una longitud de 2400 m ya que en ese segmento se encuentra ubicado el horizonte de arcilla de baja plasticidad identificado en el perfil de suelo (Ver Fig. 9).

El procedimiento que incluye la incertidumbre aleatoria puntual se realizó mediante la aplicación de la Ecu (9) donde la parte 1 corresponde a la desviación estándar al cuadrado de los valores observados de la variable aleatoria. La parte 2 fue calculada utilizando los valores de $\gamma(h)$ del variograma empírico. Y para la parte 3 se realizó una aproximación

numérica de la derivada, se obtuvo la pendiente de la línea de tendencia de $Z(x_i + h) - Z(x_i)$ versus $Z(x_i)$. La parte 3 de la Ecu. (9) da como resultado -0.8356 para el peso unitario total (Ver Fig. 10) y -0.9398 para la resistencia al corte no drenada (Ver Fig. 11).

Conocidos los términos de la Ecu. (9) se obtuvo el segundo momento estadístico del variograma y se siguió el procedimiento explicado en el numeral 3. Finalmente se obtuvieron las áreas de estimación correspondientes a la evaluación de la Ecu. (2) en los dos puntos óptimos, el variograma convencional una desviación estándar por encima y una por debajo.

Utilizando los resultados obtenidos de las superficies de estimación para las variables peso unitario y resistencia al corte no drenada tanto para el caso convencional como para el modificado, se realizó el diseño basado en confiabilidad de una zapata cuadrada con el fin de determinar la influencia de la incertidumbre aleatoria puntual en la interpolación de variables regionalizadas.

La zapata fue localizada sobre el horizonte de arcilla de baja plasticidad identificado en el perfil de suelos, específicamente entre las perforaciones SE3-2 y SE3-4 sobre el alineamiento como se observa en la Fig. 12.

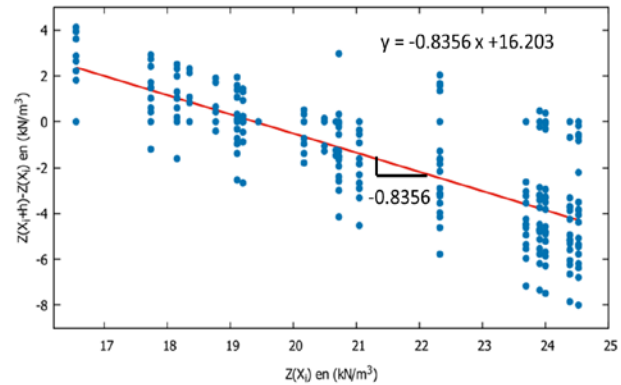


Figura 10. Cálculo de la derivada numérica correspondiente a la parte 3 de la Ecu. (8) para la variable peso unitario.

Fuente: Los autores

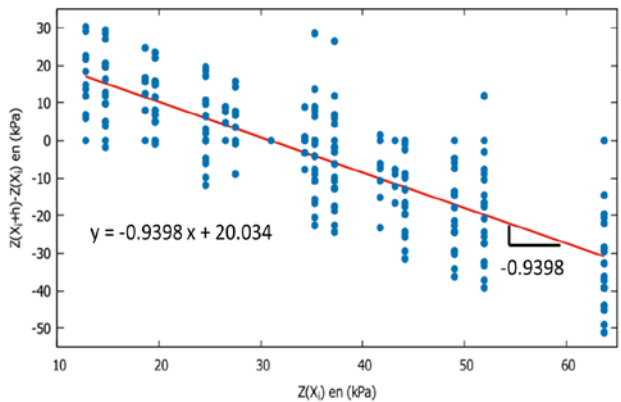


Figura 11. Cálculo de la derivada numérica correspondiente a la parte 3 de la Ecu. (8) para la variable resistencia al corte no drenada.

Fuente: Los autores

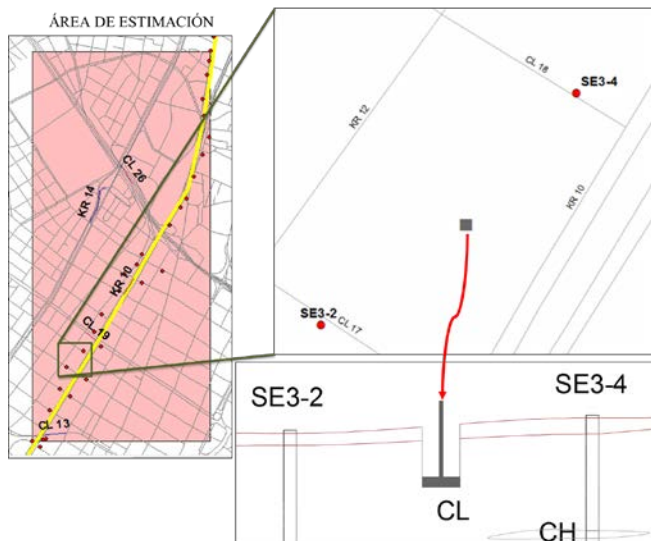


Figura 12. Localización de la cimentación superficial.
Fuente: Los autores

El diseño de la cimentación superficial se realizó por capacidad portante en condición no drenada, teniendo en cuenta que las variables a las que se les aplicó la geoestadística convencional y modificada fueron el peso unitario total γ y la resistencia al corte no drenada S_u de un horizonte de arcilla de baja plasticidad. La función de desempeño utilizada fue la expresión del factor de seguridad que relaciona la capacidad portante del suelo con la carga aplicada.

Para este caso en particular, se realizó el análisis en condición no drenada para una zapata cuadrada con carga vertical. La cimentación corresponde a la zapata más cargada de una edificación de 3 plantas de 81 m² donde el avalúo de cargas fue de 7.5 kPa de carga muerta y 2.5 kPa de carga viva por piso sin mayorar. Su área aferente fue de 60.75 m² incluyendo las tres plantas.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, la Ecu. (12) corresponde a la función de desempeño que se utilizará en el análisis de confiabilidad.

$$FS = \frac{b l [5.14 S_u F_{cs} F_{cd} + \gamma D_f]}{60.75 (D + L) + \gamma_c b l h} \quad (12)$$

Donde b , l y h corresponden al ancho, largo y alto de la cimentación, S_u a la resistencia al corte no drenada del suelo, F_{cs} y F_{cd} son los factores de corrección por forma y profundidad, γ es el peso unitario del suelo, γ_c el peso unitario total del concreto, D_f es la profundidad de desplante, D y L corresponden a la carga muerta y carga viva sin mayorar respectivamente.

Las variables que se consideran aleatorias en este análisis son el peso unitario total del suelo γ y la resistencia al corte no drenada S_u , sin embargo es importante tener en cuenta que las cargas también presentan incertidumbre que debe ser incluida en un diseño por confiabilidad, por tal razón se decidió considerar la carga muerta y la carga viva como variables aleatorias.

Tabla 5. Estadísticos de las variables aleatorias carga muerta y carga viva.

Estadísticos	W_D (kPa)	W_L (kPa)
Media	7.50	2.50
Desviación estándar	0.75	0.45
Varianza	0.56	0.20
COV (%)	10.00	18.00
Referencia	[19, 10, 16]	[10]

Fuente: Los autores

Tabla 6. Resultados obtenidos aplicando la geoestadística convencional..

Estadísticos	S_u (kPa)	γ (kN/m ³)
Media	35.02	19.73
Desviación estándar	16.14	1.43
Varianza	260.59	2.05
COV (%)	46.00	7.00

Fuente: Los autores

Tabla 7. Resultados obtenidos aplicando la geoestadística modificada.

Estadísticos	S_u (kPa)	γ (kN/m ³)
Media	34.56	19.54
Desviación estándar	17.00	1.44
Varianza	289.15	2.08
COV (%)	49.00	7.00

Fuente: Los autores

Se utilizaron los estadísticos de la Tabla 5 para las variables carga muerta y carga viva para edificaciones, obtenidos de diferentes autores.

5. Resultados

Los resultados obtenidos para el punto donde se ubicó la cimentación superficial se presentan en la Tabla 6 con la aplicación del procedimiento convencional y en la Tabla 7 con la aplicación del procedimiento modificado.

En los resultados obtenidos referentes al peso unitario total se observa que los valores medios de la estimación convencional comparados con los obtenidos con la propuesta de modificación no difieren considerablemente, sin embargo se observa que el procedimiento modificado presenta un aumento en la varianza y en la desviación estándar, reflejando la incertidumbre que se propaga en el proceso geoestadístico desde la variabilidad puntual natural.

En los resultados de la resistencia al corte no drenada, sus valores medios tampoco difieren en gran medida, sin embargo, la incertidumbre de la variable estimada con la propuesta de modificación aumentó el 3% en términos del coeficiente de variación con respecto al convencional. Lo anterior, igual que en el caso del peso unitario, refleja la propagación de la incertidumbre dada por la variabilidad natural con el procedimiento propuesto.

Realizado el análisis de confiabilidad para diferentes combinaciones de profundidad de desplante y dimensiones de la cimentación superficial, en la Fig. 13 se puede observar que el valor esperado del factor de seguridad es prácticamente igual para el caso modificado que para el caso convencional, lo que se explica teniendo en cuenta que los valores medios de las estimaciones

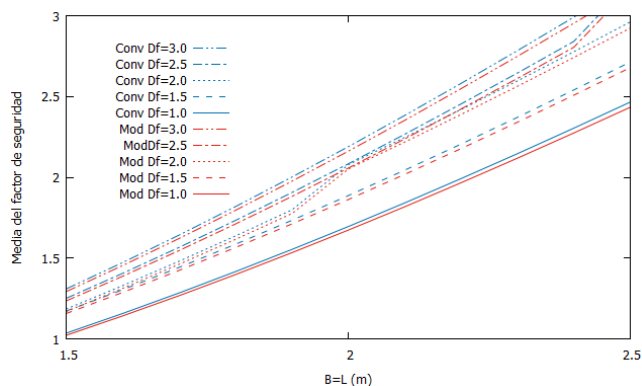


Figura 13. Factor de seguridad para diferentes Df y B=L calculados con Primer Orden Segundo Momento.

Fuente: Los autores

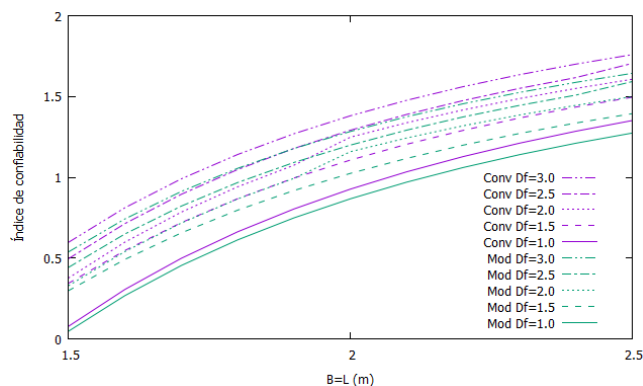


Figura 15. Ábaco de diseño por confiabilidad convencional y modificado.

Fuente: Los autores

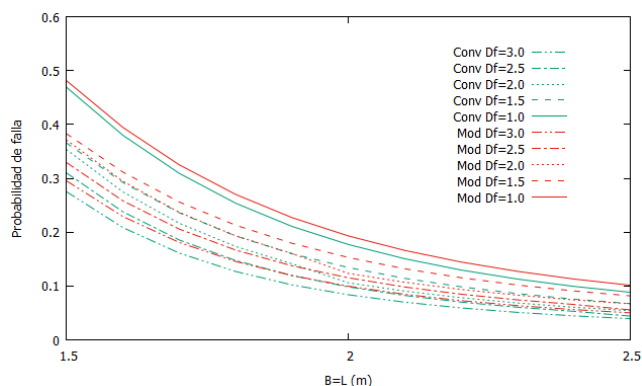


Figura 14. Ábaco de diseño por probabilidad de falla convencional y modificado.

Fuente: Los autores

de las variables también son prácticamente iguales y la influencia de la incertidumbre aleatoria puntual incluida se observa en la varianza de la predicción.

En las Figs. 13, 14 y 15 “Conv Df” corresponde a las curvas que se obtienen con la aplicación del procedimiento convencional para diferentes profundidades de desplante y “Mod Df” a las que se obtienen con el procedimiento modificado para diferentes profundidades de desplante.

En la Fig. 14 se presenta el ábaco de diseño por probabilidad de falla para el caso convencional y el modificado, calculado suponiendo una función de densidad de probabilidad normal para el factor de seguridad. Con el uso de este ábaco se pueden conocer las dimensiones y profundidad de desplante que debe tener una zapata cuadrada para satisfacer una probabilidad de falla determinada.

Se puede observar en la Fig. 14 que a partir de 1.5 metros de B=L de la cimentación, las curvas de probabilidad de falla se encuentran separadas y en la gráfica del factor de seguridad versus las dimensiones de la cimentación en la Fig. 13 se puede identificar que precisamente ese rango de dimensiones es donde las cargas actuantes son mayores que las resistentes para las diferentes profundidades de desplante.

El comportamiento más importante observado en el ábaco de diseño por probabilidad de falla (Fig. 14), es que cuando

las cargas resistentes son menores que las actuantes la probabilidad de falla convencional es aproximadamente igual que la modificada que tiene incluida la incertidumbre aleatoria puntual de las variables.

Es importante también resaltar que cuando el factor de seguridad es mayor a 1 la probabilidad de falla para el caso donde se incluye la incertidumbre aleatoria puntual siempre es mayor que para el caso convencional, entonces se puede afirmar que las dimensiones de una zapata que satisfacen una probabilidad de falla determinada en el caso donde no se tiene en cuenta la incertidumbre aleatoria puntual son menores que las que se requieren para satisfacer el caso donde está incluida dicha incertidumbre.

En la Fig. 15, se presenta el ábaco de diseño por confiabilidad suponiendo una función de densidad de probabilidad normal para el factor de seguridad. Nuevamente se afirma que se requieren mayores dimensiones de la cimentación superficial para satisfacer el mismo índice de confiabilidad en el caso modificado que en el convencional.

En la Fig. 15 se puede observar también que la diferencia entre el índice de confiabilidad convencional y modificado aumenta a medida que aumentan las dimensiones de la cimentación superficial, ya que para un B=L de 2.5 m el índice de confiabilidad modificado es menor que el convencional, de lo que se puede afirmar que a medida que el factor de seguridad aumenta también aumenta su incertidumbre.

6. Discusión

En el proceso de la aplicación de la geoestadística convencional y modificada se observaron diferentes comportamientos en cuanto a la influencia del variograma teórico en la estimación de las variables regionalizadas. Por ejemplo, se pudo identificar que el valor medio y la desviación estándar de las estimaciones ubicadas una distancia mayor a la longitud de correlación con respecto a las mediciones son aproximadamente el valor medio y la desviación estándar de la variable. Esto ocurre debido a que, a mayor distancia de separación entre la ubicación no muestreada y las mediciones, la incertidumbre aumenta y se

vuelve constante cuando dicha distancia supera la longitud de correlación de la variable.

Otro aspecto importante es que cuando el variograma teórico al cual se ajustan los datos presenta una meseta muy grande y una distancia de correlación pequeña, la superficie de predicción espacial tiende a ser homogénea tanto en su valor medio como en su varianza. Lo anterior es representado por una zona de varianza máxima y constante dentro de la superficie de predicción que aumenta proporcionalmente con la disminución de la longitud de correlación.

En cuanto a los resultados de la aplicación de la geoestadística convencional comparados con los obtenidos con la propuesta de modificación se puede afirmar que los valores medios de las predicciones convencional y modificada no difieren representativamente, sin embargo, la influencia de la incertidumbre aleatoria integrada en la interpolación espacial de variables regionalizadas se puede observar en la varianza de las predicciones.

Teniendo en cuenta que la influencia de la incertidumbre aleatoria puntual se ve reflejada en la incertidumbre de la predicción y no tanto en su valor medio, se puede afirmar que la utilización de este método es representativa siempre y cuando el diseño geotécnico se haga basado en confiabilidad.

En cuanto a los resultados del análisis de confiabilidad se observa que el valor esperado del factor de seguridad es prácticamente igual para los casos modificados que para el caso convencional, lo que se explica teniendo en cuenta que los valores medios de las estimaciones de las variables también son prácticamente iguales y la influencia de la incertidumbre aleatoria puntual incluida se observa en la varianza de la predicción.

Un comportamiento importante identificado luego del análisis de confiabilidad es que cuando las cargas resistentes son menores que las actuantes la probabilidad de falla convencional es igual que la modificada.

7. Conclusiones

A menor incertidumbre aleatoria puntual la estimación con el procedimiento modificado no se ve afectada considerablemente, sin embargo, a medida que la incertidumbre puntual aumenta también aumenta la incertidumbre de la estimación de la variable en una localización no muestreada al propagarse dicha incertidumbre puntual.

El hecho de que los valores medios de las estimaciones de las variables sean aproximadamente iguales para el caso convencional que para el modificado, hace que la media del factor de seguridad también sea aproximadamente igual en ambos casos, ya que la influencia de la inclusión de la incertidumbre aleatoria puntual realmente se observa en la magnitud de incertidumbre del factor de seguridad.

La incertidumbre aleatoria puntual no se refleja tanto en el valor medio de la estimación si no en su varianza, por lo que la utilización de este método es representativa siempre y cuando el diseño geotécnico se haga basado en confiabilidad.

Cuando las cargas resistentes son menores que las actuantes la probabilidad de falla convencional es igual que

la modificada, sin embargo, cuando el factor de seguridad es mayor a 1 la probabilidad de falla para el caso donde se incluye la incertidumbre aleatoria puntual es mayor que para el caso convencional.

Las dimensiones de la estructura que satisfacen una probabilidad de falla determinada en el caso donde no se tiene en cuenta la incertidumbre aleatoria puntual son menores que las que se requieren para satisfacer el caso donde está incluida dicha incertidumbre. Lo mismo ocurre en el caso del índice de confiabilidad ya que se requieren mayores dimensiones de la cimentación superficial para satisfacer el mismo índice de confiabilidad en los casos modificados que en el convencional.

Referencias

- [1] ASTM, D. Standard practice for classification of soils for engineering purposes, unified soil classification system. Annual Book of ASTM Standards, pp. 249-260, 2000.
- [2] Baecher, G.B. and Christian, J.T., Reliability and statistics in geotechnical engineering. British Library, 2005.
- [3] Canavos, G., Probabilidad y estadística, aplicaciones y métodos, vol. 1. Universidad Autónoma de México, Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, 1988.
- [4] Dubost, J., Denis, A., Marache, A. and Breysse, D., Effect of uncertainties in soil data on settlement of soft columnar inclusions. *Engineering Geology*, 121(3), pp. 123-134, 2011. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.05.004
- [5] Giraldo, R., Introducción a la geoestadística, teoría y aplicación, Universidad Nacional de Colombia, 2000.
- [6] Griffiths, V., Quantitative risk assessment in geotechnical engineering, the first order second moment method, foshm. Technical report, Colombian Geotechnical Society, 2016.
- [7] Gutiérrez, A., Ramirez, A., Lebel, T., Santillán, O. y Fuentes, C., El variograma y el correlograma, dos estimadores de la variabilidad de mediciones hidrológicas. *Revista Facultad de Ingeniería*, (59), pp. 193-202, 2012.
- [8] Hidalgo-Montoya, C.A. y Pacheco-de Assis, A., Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: la teoría. *Revista Ingenierías*, Universidad de Medellín, 10(18), pp. 69-78, 2011.
- [9] Instituto de Desarrollo Urbano, [en línea]. [Consultado: 14 de Julio de 2015]. Disponible en: www.idu.gov.co.
- [10] Law, S. and Li, J., Updating the reliability of a concrete bridge structure based on condition assessment with uncertainties. *Engineering Structures*, 32(1), pp. 286-296, 2010. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.09.015
- [11] Marache, A., Breysse, D., Piette, C. and Thierry, P., Geotechnical modeling at the city scale using statistical and geostatistical tools: the pessac case (france). *Engineering Geology*, 107(3), pp. 67-76, 2009. DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.04.003
- [12] Matheron, G., Curso de geoestadística, Escuela de Minas de París, 1969.
- [13] Niandou, H. and Breysse, D., Reliability analysis of a piled raft accounting for soil horizontal variability. *Computers and Geotechnics*, 34(2), pp. 71-80, 2007. DOI: 10.1016/j.compgeo.2006.09.006
- [14] Ozturk, C. and Simdi, E., Geostatistical investigation of geotechnical and constructional properties in kadikoy-kartal subway, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, pp. 35-45, 2014. DOI: /10.1016/j.tust.2013.11.002
- [15] Prada, F., Ramos, A., Solaque, D. and Caicedo, B., Confiabilidad aplicada al diseño geotécnico de un muro de contención. *Obras y proyectos*, (9), pp. 49-58, 2011. DOI: 10.4067/S0718-28132011000100006

- [16] Ramos, A., Relación entre parámetros de movimiento fuerte y deslizamientos. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [17] Sánchez-Silva, M., Introducción a la confabilidad y evaluación de riesgos. Teoría y Aplicaciones en Ingeniería, vol. 1. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, 2005.
- [18] Soltani-Mohammadi, S., Fuzzy Krig a comprehensive Matlab toolbox for geostatistical estimation of imprecise information. *Earth Science Informatics*, 9(2), pp. 235-245, 2015. DOI: 10.1007/s12145-015-0240-4
- [19] Soltani-Mohammadi, S. and Safa, M., A simulated annealing based optimization algorithm for automatic variogram model fitting. *Archives of Mining Sciences*, 61(3), pp. 635-649, 2016. DOI: 10.1515/amsc-2016-0045
- [20] Vu, K.A.T. and Stewart, M.G., Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural Safety*, 22(4), pp. 313-333, 2000. DOI: 10.1016/S0167-4730(00)00018-7
- M.A. Munévar-Peña**, es Ing. en Transporte y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja (2007) y MSc. en Ingeniería Civil con énfasis en geotecnia de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá (2017). Participó en la elaboración de estudios para diseños de sistemas de alerta temprana por avalanchas. Coordinador del diseño del sistema de alerta temprana por avalanchas de Salgar (Antioquia) y Mocoa (Putumayo, Colombia). Docente de cátedra en la Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Miembro del grupo de investigación Riesgo en sistemas naturales y antrópicos. Áreas de interés: incertidumbre en geotecnia, riesgo por amenazas naturales.
ORCID: 0000-0003-0740-3593
- A.M. Ramos-Cañón**, es Ing. Civil de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, (2000), MSc. en Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia (2003) y Dr. en Ingeniería de la Universidad de los Andes, Bogotá (2011). Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería, del Instituto Geofísico de la Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Dirige proyectos relacionados con diseños de sistemas de alerta temprana por avalanchas. Líder del grupo de investigación Riesgo en sistemas naturales y antrópicos.
ORCID: 0000-0003-2306-4333
- L.F. Prada-Sarmiento**, es Ing. Civil de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, (2000), MSc. en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes Bogotá (2004) y Dr. en Ingeniería de la Universidad Karlsruhe (2011). Profesor asociado de la Facultad de la Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Participó en proyectos relacionados con diseños de sistemas de alerta temprana por avalanchas. Miembro del grupo de investigación Riesgo en sistemas naturales y antrópicos.
ORCID: 0000-0003-2439-4828

Application software in Python 3 for calculating the second-order tensors Jelínek's statistics in anisotropy of magnetic susceptibility data

Exneyder A. Montoya-Araque & Ludger O. Suarez-Burgoa

*^aGrupo de Investigación de Geotecnia, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
eamontoyaa@unal.edu.co, losuarezb@unal.edu.co*

Received: March 12th, 2018. Received in revised form: July 10th, 2018. Accepted: July 15th, 2018.

Abstract

In this paper, the statistics applied to second-order tensors is dealt, specifically the Anisotropy of Magnetic Susceptibility tensors under the methodology proposed by Jelínek in [1] on tensorial statistic. For understanding the mathematics implicit in the calculi totally, that methodology was developed in a computational code written in the language Python 3 which is available in the software repository GitHub with the name of **jelinekstat**; from there, it can be acquired, studied, modified, improved or extended. The code was validated with the outcomes presented in the study of [2], where deformational and depositional events in the Upper Member of the Amagá formation in the department of Antioquia (Colombia) were interpreted and analyzed. Since it is an open-source and practical tool, the code can be used in the academy, research and industry.

Keywords: anisotropy of magnetic susceptibility, Jelínek, tensor statistics, Python, application software.

Software de aplicación en Python 3 para el cálculo de la estadística de tensores de segundo orden de Jelínek en datos de anisotropía de susceptibilidad magnética

Resumen

En este artículo se aborda la estadística aplicada a tensores de segundo orden, específicamente los de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética bajo la metodología propuesta por Jelínek en [1] sobre estadística tensorial. Para poder comprender totalmente la matemática implícita en este cálculo, dicha metodología fue desarrollada en un código computacional escrito en el lenguaje de programación Python 3 que se encuentra disponible en repositorio de programas GitHub con el nombre de **jelinekstat**; desde allí puede ser adquirido, estudiado, modificado, mejorado o ampliado. Dicho código fue validado con los resultados presentados en el estudio de [2], donde se interpreta y analiza eventos deformativos y depositivos en el Miembro Superior de la Formación Amagá en el departamento de Antioquia (Colombia). Por ser de código abierto y por su practicidad, puede ser usado en la academia, investigación y en la industria.

Palabras clave: anisotropía de susceptibilidad magnética, Jelínek, estadística de tensores, Python, software de aplicación.

1. Introducción

En este artículo se aborda la solución de un cálculo matemático el cual es posiblemente el último paso de una investigación geológica sobre la anisotropía magnética de rocas, *i.e.*, el cálculo matemático-estadístico del Tensor de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM) mediante la aplicación de un programa computacional de licencia libre en el lenguaje de programación Python 3.

Se desarrolla un contexto teórico mínimo necesario para introducir el término del objeto matemático tensor de segundo orden, el cual define la ASM medida en un espécimen. Se presenta el método propuesto por [1] para el tratamiento estadístico básico de una *muestra* o grupo de n especímenes tomados aleatoriamente y finalmente se presenta el software de aplicación desarrollado para lograr lo anterior; aquí se incluyen sus generalidades, ejecución y objetos de entrada y salida.

How to cite: Montoya-Araque, E.A. and Suarez-Burgoa, L.O., Software de aplicación en Python 3 para el cálculo de la estadística de tensores de segundo orden de Jelínek en datos de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética. Boletín de Ciencias de la Tierra, 44, pp. 49-58, Julio, 2018.

Los resultados que retorna el programa computacional son validados con aquellos obtenidos en el estudio de [2] donde se interpreta y analiza eventos de deformacionales y depositacionales en el Miembro Superior de la Formación Amagá en el departamento de Antioquia (Colombia).

2. Susceptibilidad magnética y su tensor de anisotropía

2.1. Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética (*Bulk Magnetic Susceptibility*) por unidad de volumen (k_b , como escalar y medida global sin tomar en cuenta la posible variación con la orientación espacial) de un sólido (*i.e.*, en este caso una roca homogénea e isótropa en su composición mineralógica desde el punto de vista de reacción al magnetismo) se define como la relación de la magnetización \mathbf{M} con la intensidad del campo magnético externo \mathbf{H}

$$k_b = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{H}} \quad (1)$$

La susceptibilidad magnética es una medida del *grado de magnetización* de un material, por ejemplo, los minerales de la roca, al estar influenciados por un campo magnético externo; en el caso de las rocas, este sería el *campo magnético terrestre* (CMT) en forma natural.

La susceptibilidad magnética (en la mayoría de los minerales que tienen una respuesta al magnetismo) no es constante en todas las direcciones; por tanto, no se cumple la definición de escalar en un sistema tridimensional. En este caso, la respuesta magnética de la roca \mathbf{M} depende de la orientación de la masa con la orientación del campo magnético; es decir, que la roca es ortótropa o anisótropa. De ahí surge el concepto de *tensor de anisotropía de susceptibilidad magnética*.

La ortotropía o anisotropía en la roca se puede deber a que un solo tipo de minerales que responden al magnetismo están orientados en una de tres posiciones ortogonales en el espacio. También se puede deber a que se tiene más de un mineral que responde al magnetismo, pero que sus propiedades de cada tipo son distintas, y en conjunto todos los minerales manifiestan la anisotropía.

2.2. El tensor de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM)

El tensor de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (*i.e.*, tensor ASM) es uno de orden segundo representado con el símbolo \mathbf{K} , que se puede expresar en forma de una matriz de 3×3 como \mathbf{K} .

El tensor de segundo orden (\mathbf{K}) representa cuánto vale la susceptibilidad magnética para la componente del campo magnético en dirección x en tres direcciones x , y , y z : $\mathbf{k}_x = (k_{11}, k_{12}, k_{13})$; luego cuánto vale la susceptibilidad magnética para la componente del campo magnético en dirección y en las mismas tres direcciones x , y , y z : $\mathbf{k}_y = (k_{21}, k_{22}, k_{23})$; y finalmente, cuánto vale la susceptibilidad

magnética para la componente del campo magnético en dirección z en las tres direcciones x , y , y z : $\mathbf{k}_z = (k_{31}, k_{32}, k_{33})$.

De este modo, el tensor de anisotropía de susceptibilidad magnética es

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

definido por los elementos en sus nueve términos k_{ij} que son escalares.

Sin embargo, \mathbf{K} por definición (de tensor de segundo orden) es simétrico, entonces sus componentes se reducen a seis escalares distintos.

Como todo tensor tipo Cauchy, se aplican las propiedades de este objeto matemático. Por ejemplo, si el sistema coordenado se rota de tal modo que los términos $k_{ij} = 0$ para $i \neq j$ y $k_{ij} = 0$ para $i = j$, entonces tres magnitudes del tensor se pueden representar en tres direcciones propias. Las tres magnitudes así rotadas se llaman *valores propios* o *valores principales* y los vectores de las direcciones cuando actúan los valores propios se llaman *vectores propios* o *vectores principales*.

El tensor de ASM entonces se puede también definir como un tensor simétrico de segundo orden en el cual la magnitud de sus tres orientaciones propias del tensor (k_1, k_2, k_3) reflejan las respuestas más influyentes en las tres direcciones ortogonales de los dipolos magnéticos dentro de un campo magnético; modificado de [3].

El tensor ASM tiene una variedad de escalares estadísticos para su caracterización, los cuales eventualmente podrían ser de interés para el usuario que manipule este tipo de datos; en [4] (Seccs. 1.5.1 a 1.5.2, Tab. 1.1) se profundiza esto.

2.3. Representaciones gráficas del tensor de ASM

Si las direcciones propias del tensor simétrico del segundo orden \mathbf{K} se colocan mutuamente ortogonales, y a partir del origen de estas tres direcciones se trazan tres semiejes paralelos a los ejes coordenados y en el sentido positivo de estos ejes, tal que: para la dirección propia mayor se coloca un semieje de longitud igual al valor propio mayor del tensor, para la dirección propia intermedia un semieje de longitud igual al valor propio intermedio y para la dirección propia menor la longitud igual al valor propio menor, entonces se obtiene un octante positivo de un elipsoide. Con el octante se completa todo el elipsoide por simetría ortogonal; donde finalmente se construye el *elipsoide de susceptibilidad magnética*.

La Fig.1 muestra esquemáticamente el octante y el elipsoide del tensor de anisotropía de susceptibilidad magnética, donde el eje mayor es la línea del alineamiento magnético y el plano cuyo vector ortogonal es la dirección propia menor del tensor corresponde a la foliación magnética.

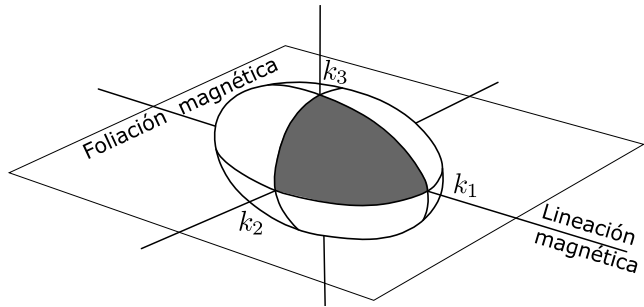


Figura 1. Elipsoide de anisotropía de la susceptibilidad magnética.
Fuente: Los autores.

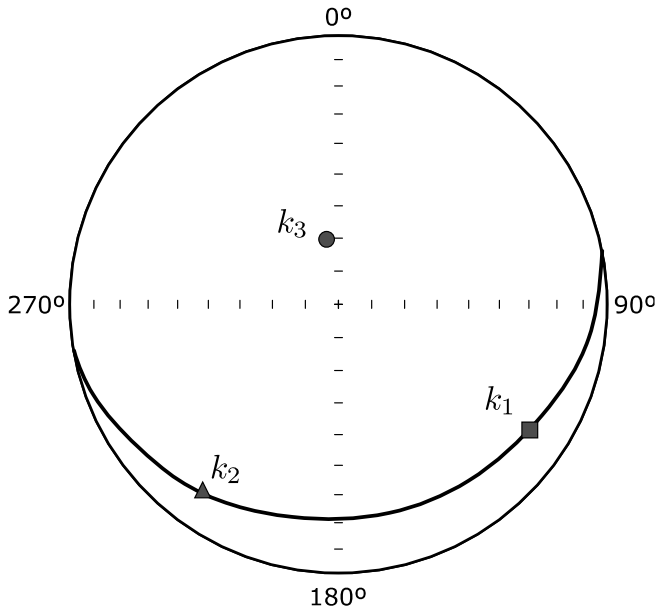


Figura 2. Las direcciones propias del tensor ASM en proyección esférica equiangular.
Fuente: Los autores.

La Fig.2 muestra esquemáticamente los tres puntos en la proyección estereográfica equiangular que representan las tres orientaciones propias del tensor de anisotropía de la susceptibilidad magnética. Estos tres puntos tienen una particularidad gráfica en esta proyección que está relacionada al tensor: los puntos que representan la orientación propia de mayor e intermedia definen un plano (en la proyección) cuyo polo corresponde al punto que representa la orientación propia menor. Esto se debe a la ortogonalidad de las direcciones propias de un tensor de segundo orden y es una de las propiedades bases dentro del desarrollo estadístico presentado más adelante.

2.4. Relación del tensor ASM con H y M

Como H y M son realmente vectores en el espacio, se representarían más adecuadamente con los símbolos h y m . La relación que tiene el tensor ASM con la dirección del campo magnético h (que es generalmente un punto en el CMT) y el grado de magnetización m se puede explicar del siguiente modo:

- La roca tiene minerales que responden al magnetismo y están orientadas en el espacio dado por un vector d .
- Estas rocas están dentro de un campo magnético H que en el punto donde está la roca tiene una cierta dirección h .
- Debido a que estos minerales están todos orientados, estos generan en un volumen de roca un campo magnético m , *i.e.*, la magnetización.
- ¿Qué objeto matemático relacionará h con m ? --El tensor ASM, K , con la operación tensorial

$$m = K h \quad (3)$$

Debido a que m y h son ambos campos magnéticos por unidad de volumen, entonces en el sistema internacional de unidades, el tensor K tiene dimensión uno, *i.e.*, [2] (erróneamente llamado *adimensional*).

2.5. Cálculo del tensor ASM

La operación directa de la relación entre los vectores h y m indica que conocido h y K se puede conocer m . Sin embargo, la operación contraria indica que se tiene que hallar K a partir de h y m ; y este aspecto implica un proceso de inversión de datos.

Lo anterior implica que existe un procedimiento tal que a partir de las medidas de h y m (para diferentes orientaciones relativas de h y m) se calcule el tensor K .

Debido a que las medidas tienen errores sistemáticos, que convierte a K en una variable aleatoria y su estimación se convierte entonces en un proceso estadístico como lo es el método de [1] el cual se usa en este artículo para la solución del cálculo inverso.

3. Estadística del tensor ASM, método de Jelínek

Como se vio arriba, el tensor K , se puede reducir a tres direcciones propias; que si se tiene varios datos de medidas para cada una de esas tres orientaciones se tendrá una nube de puntos muy cercanos.

Inicialmente se puede aplicar la estadística de vectores a cada una de estas direcciones según lo propuesto por Fisher en [5], pero no es correcto porque la distribución alrededor de cada orientación propias no es de tipo esférica y las tres orientaciones no son estadísticamente independientes, ya que las tres están relacionadas entre sí por la condición geométrica de ortogonalidad.

Para corregir este inconveniente y poder seguir usando la estadística de Fisher, Jelínek en [1], con base al trabajo de Hext en [6] (por tanto debería llamarse el *método de Hext-Jelínek* pero la literatura sólo toma a uno de los autores y especialmente al segundo), desarrolla un método estadístico que se basa en el promedio de todos los tensores medidos que constituyen la muestra después de un proceso de normalización con el promedio de sus valores principales; lo que hace de este método un método fácil y preciso.

Con este método se estima entonces el tensor ASM promedio de la muestra, \bar{K} , su matriz de covarianza \hat{V} y los límites de variabilidad de los valores propios (k_1, k_2, k_3) y

vectores propios ($\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3$) de $\hat{\mathbf{K}}$ para un nivel de confiabilidad dado, siendo en el segundo caso una región que define la forma de una elipse que se localiza ortogonalmente al respectivo vector propio.

Las consideraciones de [1] indican que los errores de las medidas de las muestras son bajos y que están distribuidos de forma gaussiana, además, los tensores de la muestra de donde se estima $\hat{\mathbf{K}}$ están normalmente distribuidos. Bajo estas suposiciones se estiman las regiones de confiabilidad a través de un esquema de propagación lineal de las incertidumbres en la descomposición de los valores propios del tensor. Para el manejo de los valores redundantes se basa en la teoría de mínimos cuadrados; y el marco de los cálculos es la teoría estándar multivariada.

Sin embargo, el método de Jelínek falla si las direcciones propias no están distribuidas simétricamente, si las orientaciones propias están *intermezcladas* o si las orientaciones propias no oscilan alrededor de cada una de las orientaciones promedio de las medidas. Cuando se dice *intermezcladas*, se refiere por ejemplo a que un espécimen *a* de la muestra puede tener una orientación \mathbf{k}_{1a} que representa el valor propio mayor y que un espécimen *b* de la misma muestra puede tener una orientación \mathbf{k}_{2b} que representa el valor propio intermedio (o menor) muy cercana a \mathbf{k}_{1a} ([4] citando a [7]).

4. Software de Aplicación **jelinekstat**

Como *software* se define al conjunto de *programas computacionales*, procedimientos y posiblemente documentación asociada y datos pertinentes para la operación de un sistema computacional [8]; mientras que *software de aplicación* (desde ahora con la sigla SA) es aquel diseñado para ayudar a los usuarios a llevar a cabo tareas o encargarse de ciertos tipos de problemas, distinto de aquel software que controla el computador [8]. Siendo un *programa computacional* una unidad sintáctica que engloba a las reglas de un particular lenguaje de programación y que está compuesto de declaraciones, sentencias condicionales e instrucciones necesarias para una función, tarea o solución de un problema [9].

A continuación, se presenta el SA desarrollado para el presente artículo, **jelinekstat**, el cual se encuentra empaquetado y enlazado en el repositorio **PyPI** (siglas del idioma inglés de *the Python Package Index*). para su instalación mediante el manejador de paquetes PIP con la siguiente instrucción en consola:

```
pip install jelinekstat
```

El SA **jelinekstat** es un software de aplicación libre (licencia académica BSD-2) y de código abierto que se ha desarrollado por los autores del presente artículo con el fin de analizar bajo el marco de la estadística, los datos cuyo objeto matemático es un tensor de segundo orden que representa un tensor ASM.

El SA **jelinekstat** logra obtener mediante cálculos: el tensor promedio y sus valores y vectores propios (también llamados principales), los intervalos de confianza de los valores propios del tensor promedio y finalmente las regiones

de confianza de las direcciones propias del tensor promedio a partir del método propuesto por Jelínek en [1]; todo esto englobado y presentado en un diagrama de proyección esférica equiareal.

Este SA fue escrito en el lenguaje de programación **Python 3** bajo el paradigma funcional; de este modo, son 17 funciones seccionadas en 2 módulos (un *módulo* es cada archivo en lenguaje Python con extensión **.py**) con el fin de realizar los cálculos con los datos de tensores de ASM de una muestra de *n* especímenes medidos.

La división de la aplicación en dos módulos se realiza por la necesidad de separar las funciones asociadas a las ecuaciones presentadas por Jelínek en [1] para el desarrollo del proceso estadístico (**jelinekstat.py**) y el grupo de herramientas que soportan a la metodología para su completo desarrollo tales como operaciones del algebra lineal, transformaciones de sistemas coordenados y operaciones sobre la red estereográfica (**tools.py**). El esquema de la Fig.3 muestra la organización del directorio del SA.

La documentación (*i.e.*, explicación de parámetros de entrada, salida, uso, y ejemplos) de cada una de las funciones se amplían en el Manual de Usuario cuyo enlace electrónico se muestra en el Anexo B del presente artículo.

Para facilitar el uso del módulo se debe crear un archivo de lotes con los datos de entrada de las medidas, y con ello ir estructurando el procedimiento de cálculo llamando a cada una de las 17 funciones de forma apropiada.

Como modelo de archivo de lotes, el usuario consulta el archivo **shortSCR.py** que tiene las oraciones de código mínimas necesarias para hacer un completo cálculo desde los datos de entrada, hasta los datos de salida incluyendo gráficas.

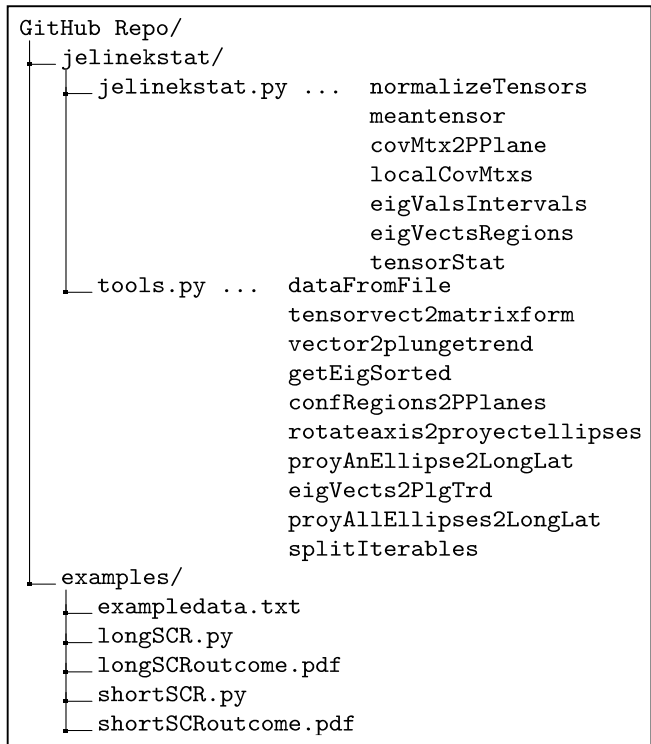


Figura 3. Estructura del directorio del SA **jelinekstat**. Fuente: Los autores.

En caso de no ser muy experto en el manejo de programas en Python 3, esta tarea está agrupada en una sola función llamada **tensorStat**.

Para que el programa corra se requiere en el intérprete de ese mismo lenguaje de programación importe a los paquetes **NumPy** y **SciPy**, además, si se quiere tener *capacidades de graficación* en la proyección esférica equiárea, se debe tener también los paquetes **Matplotlib** y **mplsteronet**; todos ellos disponibles en línea en el repositorio **PyPI**.

A continuación, se describe cada uno de los objetos computacionales que hacen los datos de entrada y salida del SA.

4.1. Objetos de entrada

Lo más importante para el uso de este programa es introducir correctamente los datos de los valores medidos de las componentes de los n tensores ASM T_k ($k \in [1, n]$) que constituyen la muestra aleatoria (grupo de n especímenes que se usan para *estimar* los estadísticos de la población).

Un tensor cualquiera T_k de segundo orden que representa una medida ASM es un tensor simétrico compuesto por seis componentes que por comodidad se pone en un vector columna:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ & t_{22} & t_{23} \\ & & t_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= [t_{11} \quad t_{22} \quad t_{33} \quad t_{12} \quad t_{23} \quad t_{13}]^T$$

Los componentes de los n tensores se reúnen en un *objeto* (definición desde el punto de vista computacional) que resulta bien sea de la importación de un archivo de texto, una lista anidada o un arreglo matricial en **NumPy**.

Si el objeto de entrada de los datos va a ser un archivo, los datos se preparan en cualquier editor de texto y se graban con la extensión **.txt**. Este archivo tendrá un arreglo de números tal que que formará una matriz de n filas y m columnas, siendo n el tamaño de la muestra, es decir, el número de tensores (dato que se tiene disponible de las mediciones) y siendo m las 6 componentes de cada tensor en su forma vectorial con el estricto orden que se muestra en la ecuación 4; la exigencia final para la importación del archivo es que el separador de columnas sea el espacio tabulador.

El siguiente listado muestra los datos de ocho tensores en el archivo **exampledata.txt** del subdirectorio de ejemplos del SA (**examples/**).

```
1.02327 1.02946 0.94727 -0.01495 -0.03599 -0.05574
1.02315 1.01803 0.95882 -0.00924 -0.02058 -0.03151
1.02801 1.03572 0.93627 -0.03029 -0.03491 -0.06088
1.02775 1.00633 0.96591 -0.01635 -0.04148 -0.02006
1.02143 1.01775 0.96082 -0.02798 -0.04727 -0.02384
1.01823 1.01203 0.96975 -0.01126 -0.02833 -0.03649
1.01486 1.02067 0.96446 -0.01046 -0.01913 -0.03864
1.04596 1.01133 0.94271 -0.01660 -0.04711 -0.03636
```

Para importar los datos del archivo de texto se usa la función del programa **extractdata** con las siguientes líneas de comando:

```
from jelinekstat.tools import dataFromFile
sample, numTensors = dataFromFile('exampledata.txt')
```

donde **sample** es un objeto del tipo **array** del módulo NumPy de Python que agrupa los objetos de arreglo matriciales que representan los tensores; y **numTensors** es el número de tensores en la muestra.

Por otro lado, si la entrada de los datos no es desde un archivo de texto, se puede lograr con un objeto **lista** con estructura anidada de la siguiente forma:

```
sample = [
    [1.02327, 1.02946, 0.94727, -0.01495, -0.03599, -0.05574],
    [1.02315, 1.01803, 0.95882, -0.00924, -0.02058, -0.03151],
    [1.02801, 1.03572, 0.93627, -0.03029, -0.03491, -0.06088],
    [1.02775, 1.00633, 0.96591, -0.01635, -0.04148, -0.02006],
    [1.02143, 1.01775, 0.96082, -0.02798, -0.04727, -0.02384],
    [1.01823, 1.01203, 0.96975, -0.01126, -0.02833, -0.03649],
    [1.01486, 1.02067, 0.96446, -0.01046, -0.01913, -0.03864],
    [1.04596, 1.01133, 0.94271, -0.01660, -0.04711, -0.03636]]
```

Eventualmente, se tendría el mismo resultado como un arreglo matricial del paquete NumPy mediante un objeto de tipo **array** a partir de la lista anidada así:

```
from numpy import array
sample = array(sample)
```

El segundo objeto de entrada para el programa es el valor numérico del estadístico que indica el *nivel de confianza*. Este debe ser almacenado en la variable **confLevel**; por ejemplo, **confLevel = 0.95** indica un nivel de confianza del 95%. Por lo regular se calcula para niveles de confianza de 50%, 95% y 99.5%.

4.2. Ejecución del programa

La ejecución del programa se puede hacer de varias formas.

1. *Embebiendo* el intérprete de Python 3 en el código de programa externo mediante una interfaz de alto nivel. Por ejemplo, desde el lenguaje C++ se crea las siguientes líneas de comandos

```
#include <Python.h>
int
main(int argc, char *argv[])
{
    Py_SetProgramName(argv[0]);
    Py_Initialize();
    PyRun_SimpleString(
        // <Escriba aquí el contenido del script del Apéndice C>
    );
    Py_Finalize();
    return 0;
}
```

- Desde la consola de cualquier sistema operativo abierta en la carpeta donde reside el script de ejecución (por ejemplo el presentado en el Apéndice C) mediante la siguiente instrucción:

```
python shortSCR.py
```

- Desde un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, acrónimo del idioma inglés de Integrated Development Environment) ejecutando allí el script.
- Escribiendo línea a línea cada comando del script directamente en el intérprete de Python 3 abierto en consola.
- Haciendo uso de cualquiera de las opciones anteriores importando la función tensorStat así:

```
from jelinekstat.jelinekstat import tensorStat
```

Todas estas opciones se tienen disponible en un SA de código abierto, y esa es la ventaja referente a los códigos cerrados, porque en código abierto se puede acoplar lo que ya está desarrollado aquí en otro programa más específico.

4.3. Objetos de salida

Una vez que el programa es ejecutado con los objetos de entrada descritos arriba, este arroja una estructura de tipo diccionario con las siguientes claves.

- El tensor promedio dado en forma de matriz 3×3 , **K**.
- El tensor promedio dado en forma de vector, **k**.
- El número de tensores con el que se realizó el cálculo, **n**.
- El valor propio mayor de **K**, **k1**, en una estructura de tipo diccionario cuyas claves son su valor, **value** y su variabilidad, **variability**.
- El valor propio intermedio de **K**, **k2**, en una estructura de tipo diccionario cuyas claves son su valor, **value** y su variabilidad, **variability**.
- El valor propio menor de **K**, **k3**, en una estructura de tipo diccionario cuyas claves son su valor, **value** y su variabilidad, **variability**.
- El vector propio mayor de **K**, **p1**, en una estructura de tipo diccionario cuyas claves son las siguientes:
 - coordenadas \mathbb{R}^3 , **coords**;
 - cabeceo o inclinación (*plunge*), **plg**;
 - dirección respecto al norte (*trend*), **trd**;
 - longitud del eje mayor de la elipse de la región de confianza, **majAx**;
 - longitud del eje menor de la elipse de la región de confianza, **minAx**;
 - inclinación del eje mayor de la elipse de la región de confianza respecto al eje vertical en el sentido de las manecillas del reloj, **incl**.
- El vector propio intermedio de **K**, **p2**, en una estructura de tipo diccionario cuyas claves son las mismas de **p1**.
- El vector propio menor de **K**, **p3**, en una estructura de tipo diccionario cuyas claves son las mismas de **p1**.

Además de lo anterior, el SA permite obtener dos resultados gráficos para visualizar tras la ejecución o como

archivos exportables con cualquier extensión permitida por **Matplotlib** bien sea de tipo vectorial o rasterizado.

El primer resultado gráfico corresponde a una figura fraccionada en tres, donde se observan las tres regiones de confianza de las direcciones principales del tensor promedio en planos ortogonales a cada una. Ejemplo de este resultado se observa en la Fig.4.

El segundo resultado gráfico corresponde a una figura en proyección esférica equiárea que contiene las orientaciones principales del tensor promedio y las elipses de sus regiones de confianza proyectadas en este sistema; también proyecta las orientaciones principales de cada una de las medidas de la muestra con la que se estimó el tensor promedio. En la gráfica, el símbolo que representa el vector principal mayor es un cuadrado, el que representan el vector principal intermedio es un triángulo, y el que representa el menor es un círculo. Si el símbolo está relleno de color negro está representando el promedio, mientras que si no está relleno es únicamente el dato de entrada. Ejemplo de este resultado se observa en la Fig.5.

Otros resultados intermedios del proceso estadístico planteado en [1] se encuentran disponibles si se ejecuta con el archivo de lotes en su versión extendida que se encuentra en el directorio de ejemplos del SA con el nombre de **longSCR.py** del subdirectorío de ejemplos.

A partir de todos los objetos de salida se puede diseñar un programa para colocar en un reporte de una hoja en formato **pdf** si se interactúa con el programa LaTeX, por ejemplo; y esta es otra ventaja de tener un código abierto.

5. Validación

La validación del SA se hizo con nueve muestras de mediciones del tensor ASM del estudio de [2], **J_{s1}**, **J_{s2}**, ..., **J_{s9}**, cada una de ellas con un total de $n = 8$ especímenes, las cuales se presentan en el Apéndice A.

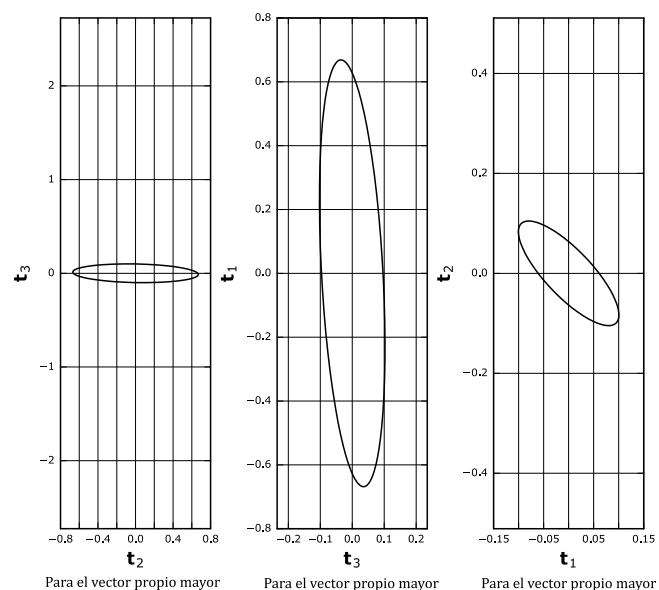


Figura 4. Elipses de confianza del 95% en el plano ortogonal a cada vector propio.

Fuente: Los autores.

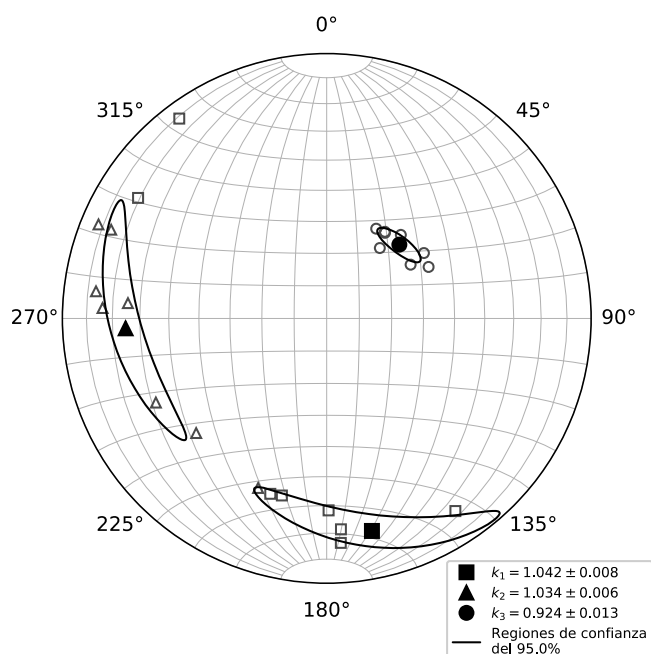


Figura 5. Ejemplo de la proyección esférica equiárea del SA **jelinekstat**: cuadrados, direcciones principales mayores; triángulos, direcciones principales intermedias; círculos, direcciones principales menores. Los valores en la leyenda son los valores propios con su respectivo límite de variabilidad para una confianza del 95%; las elipses proyectadas son las regiones de variabilidad de la misma confianza para cada dirección principal del tensor promedio.

Fuente: Los autores.

Dichos datos para la validación del SA fueron otorgados a los autores del presente artículo por gentileza los autores del trabajo de campo y laboratorio que generaron los datos de entrada de ASM usados en [2].

Debido a que los autores del mencionado estudio usaron como herramienta de análisis el programa computacional gratuito (pero en código cerrado) llamado *Anisoft 4.2*, que es un programa validado desde hace varios años y frecuentemente usado hoy en día en la industria; entonces simplemente la validación radicaré en comparar los resultados de ambos SA, y si las gráficas de resultados son las mismas, entonces los programas realizan la misma tarea.

5.1. Origen geológico de las muestras e interpretación

El trabajo de [2], sobre la ASM fue desarrollado en rocas sedimentarias de la unidad Geológica denominada formalmente como *Formación Amagá*, la cuál ha sido objeto de múltiples estudios desde hace ya casi 100 años cuando E. Grosse realizó su estudio sobre la unidad carbonífera del suroccidente antioqueño de Colombia a la cual denominó el *Terciario Carbonífero de Antioquia* [10].

El ejemplo mostrado previamente en las secciones 4.1 y 4.3, se desarrolló con los datos de la muestra **Js₉** extraída de un estrato de 10 m de espesor de una arenisca con laminación plana-paralela perteneciente a la unidad estratigráfica número cuatro del levantamiento presentado por [11] de la sección expuesta en la Quebrada Sabaleticas, donde aflora el Miembro Superior de la Formación Amagá [12].

Los datos de mediciones del tensor de anisotropía de susceptibilidad magnética en el estudio de [2], se usaron con el objeto de interpretar y analizar eventos deformacionales y depositacionales en el Miembro Superior de la Formación Amagá en el departamento de Antioquia (Colombia). Por lo anterior, en el presente estudio no se realiza una interpretación geológica de los datos, debido a que esto ya fue hecho.

5.2. Comparación de resultados

Los datos de entrada puestos en el SA Anisoft 4.2 arrojan un diagrama en proyección estereográfica equiárea con la síntesis del resultado; similarmente ocurre al hacerlo con el SA **jelinekstat** también arroja un diagrama igual como síntesis.

Las Figs. 6 y 7 están estructuradas de tal forma que las obtenidos con el programa Anisoft 4.2 del estudio original se encuentran en la subcolumna izquierda, mientras que las obtenidas con el código que se ha descrito en este artículo, el SA **jelinekstat**, se encuentran en la subcolumna derecha.

5.3. Discusión

Aunque los programas computacionales comerciales o aquellos que acompañan a los instrumentos de laboratorio son de gran utilidad para el desarrollo de las labores científicas e ingenieriles para una producción industrial, es fundamental conocer la concepción teórica que hay detrás de todo cálculo y resultado, y más aún, la forma en que se desarrollan los cálculos internamente para asegurar la confiabilidad de los resultados y además para a partir de esos datos hacer más cálculos.

Dado que en el software Anisoft no es posible visualizar las componentes del tensor promedio \hat{K} o los productos intermedios del cálculo de Jelínek como la matriz de covarianza \hat{V} , se pueden comparar únicamente la localización de los vectores propios del tensor promedio y la forma de las regiones de confianza de los mismos en los diagramas estereográficos de las nueve muestras; tal como se observa en las Figs. 6 y 7. Con este paralelo se aprecia entonces, que los diagramas son similares dando un buen argumento para la validación del programa desarrollado.

El SA **jelinekstat** es potencialmente más útil porque no es un programa cerrado y además porque no solo arroja objetos gráficos, sino que también los datos intermedios del proceso estadístico presentado por [1] que pueden ser empleados en otras aplicaciones o para otro tipo de interpretaciones.

6. Conclusiones

El código abierto y libre desarrollado por los autores y expuesto en el presente artículo, **jelinekstat**, posibilita al usuario que a partir de un grupo n de tensores simétricos y balanceados (de segundo orden), se calcule el tensor promedio y la variabilidad de sus valores y direcciones principales, estas últimas expresadas como elipses de confiabilidad.

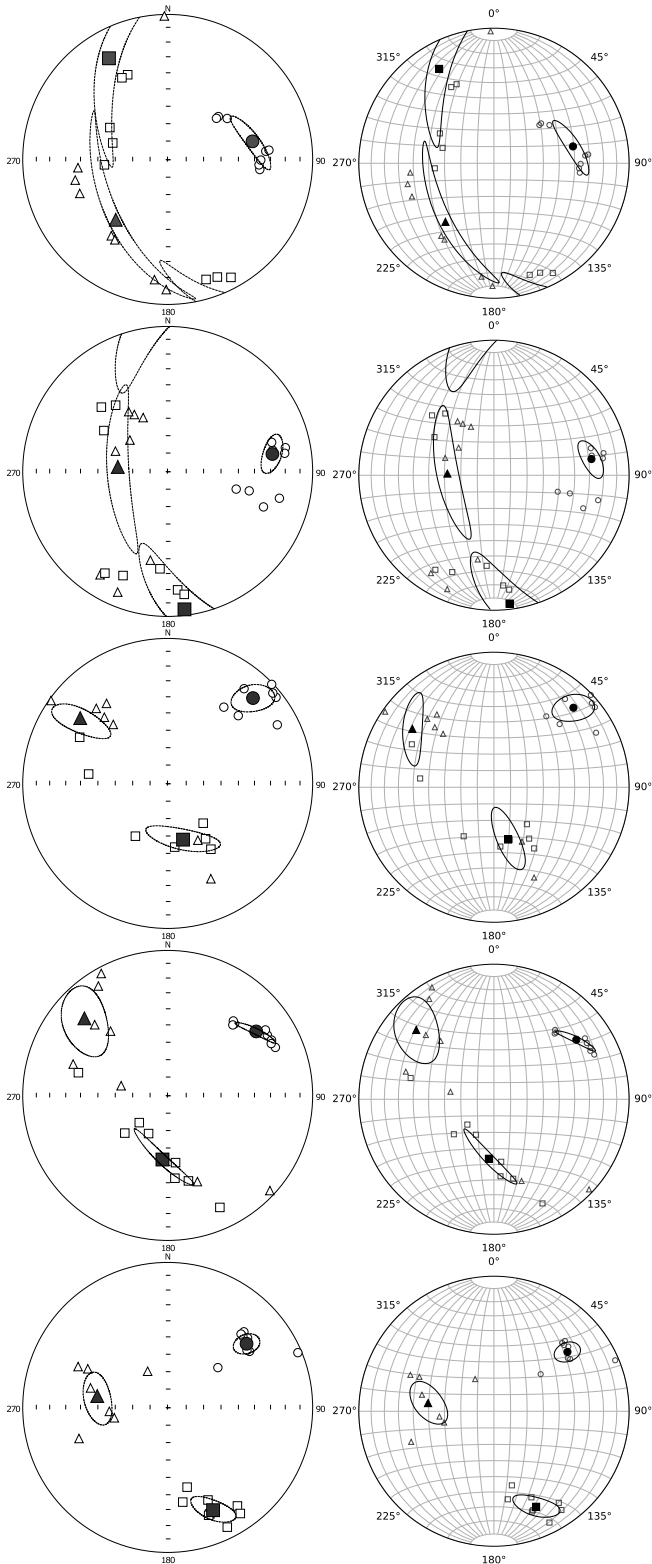


Figura 6. Comparación de los diagramas estereográficos obtenidos por Anisoft 4.2 (izquierda) y el SA jelinekstat: (derecha). Muestras **JS₁** a **JS₅**. Fuente: Los autores.

Con el SA, también posibilidad la obtención de una gráfica en proyección esférica que sintetiza lo anterior, así como la representación de los tensores de la muestra

introducidos. También es posible obtener los demás resultados intermedios del método de cálculo de Jelínek para la estadística de tensores de segundo orden.

La funcionalidad del SA es validada con datos medidos en las muestras estudiadas por [2], muestras que pertenecen al Miembro Superior de la Formación Amagá.

El programa es útil para la academia, investigación y la industria; puede ser estudiado, modificado, mejorado o ampliado bajo licencia BSD-2 según las necesidades específicas requeridas.

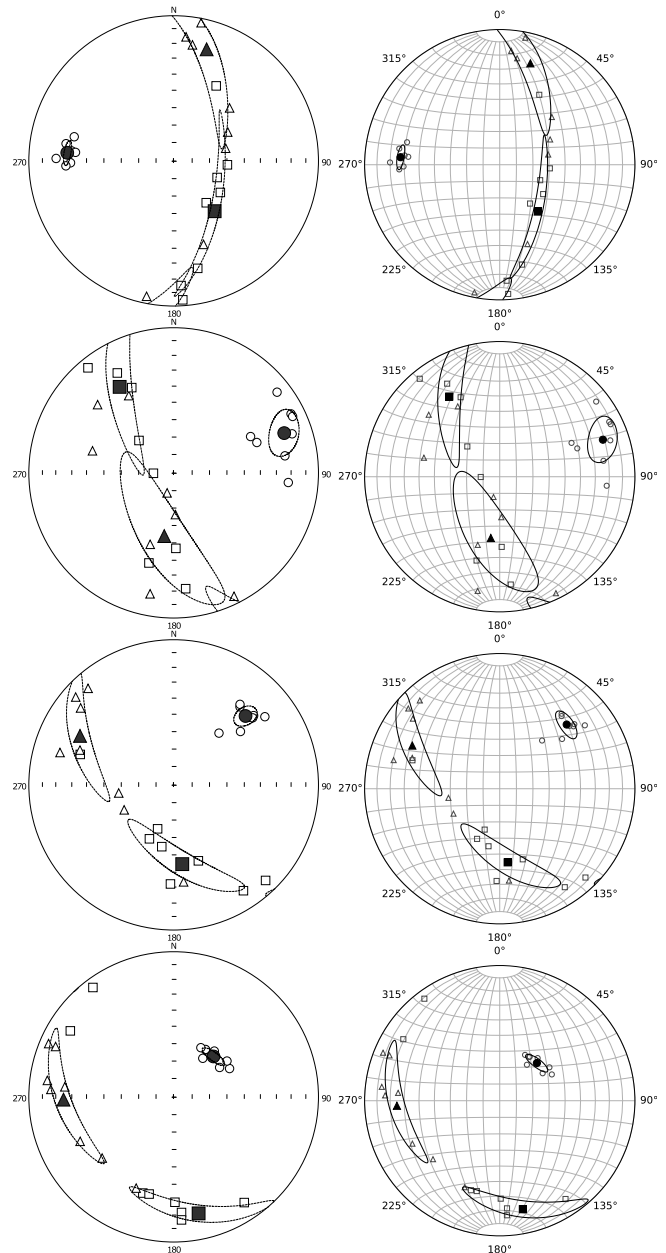


Figura 7. Comparación de los diagramas estereográficos obtenidos por Anisoft 4.2 (izquierda) y el SA jelinekstat: (derecha). Muestras **JS₆** a **JS₉**. Fuente: Los autores.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a la profesora María Isabel Marín Cerón de la Universidad EAFIT por proporcionar los datos del estudio de [2] para la validación del código. Los datos se presentan en el Apéndice A, y el lector puede replicarlos con el SA que se ofrece en este artículo.

Referencias

[1] Jelínek, V. Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on group of specimens. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 22 (1), pp. 50-62, 1978. <https://doi.org/10.1007/BF01613632>.

[2] Ramirez, J., Sierra, G. M. and Marin-Ceron, M. I. Anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) del Miembro Superior de la Formación Amagá, sección Quebrada Sabaleticas, SW antioqueño, y su relación con los movimientos del Sistema de Fallas Romeral en el Cenozoico Tardío. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 32, pp. 125-142, 2012.

[3] Hrouda, F. A determination of the symmetry of the ferromagnetic mineral fabric in rocks on the basis of the magnetic susceptibility anisotropy measurements. *Gerlands Beiträge zur Geophysik*, 82, pp. 390-396, 1973.

[4] Tarling, D. H. and Hrouda, F. *The magnetic anisotropy of rocks*, 1st edition, London: Chapman & Hall, 1993.

[5] Fisher, R. Dispersion on a Sphere. *Proceedings of the Royal Society of London*, 217 (1130), pp. 295-305, 1953. <https://doi.org/10.1098/rspa.1953.0064>.

[6] Hext, G. R., The estimation of second-order tensors, with related tests and designs. *Biometrika*, 50 (3-4), pp. 353-373, 1963. <https://doi.org/10.1093/biomet/50.3-4.353>.

[7] Ernst, E. E. and Pearce, G. W., Averaging of Anisotropy of Magnetic Susceptibility Data. In: Agterberg, F. P. and Bonham-Carter, G. F. (editors), *Statistical applications in the earth sciences*, Geological Paper of the Survey of Canada, 89 (9) 1990. pp. 297-305.

[8] ISO/IEC/IEEE, *International Standard - Systems and software engineering - Vocabulary*, Geneva - Switzerland, International Organization for Standardization, International Electrotechnical Commission, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, 24765.

[9] ISO/IEC, *International Standard - Systems and software engineering - Vocabulary*, Geneva - Switzerland, International Organization for Standardization, International Electrotechnical Commission, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, 2382.

[10] Grosse, E. Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia entre el Río Arma y Sacaajal, ejecutado en los años de 1920-1923, Berlin: Dietrich Reimer (Ernst Vohsen), 1926.

[11] Páez L. M., Marín-Ceron M. I. and Sierra G. M., Reconstrucción estratigráfica del Miembro Superior de la Formación Amagá en los sectores de La Pintada y Valparaíso (Cuenca Amagá, Andes noroccidentales), *Memorias del XIII Congreso Colombiano de Geología y XIV Congreso Latinoamericano de Geología*, Manizales. pp. 215-220, 2011.

[12] Sierra G. M., Silva J. C. and Correa L. G., Estratigrafía secuencial de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 15, pp. 9-22, 2003.

Apéndice A: Datos usados en la validación

Js ₁					
k ₁₁	k ₂₂	k ₃₃	k ₁₂	k ₂₃	k ₁₃
1.0411	0.9943	0.9646	-0.0324	-0.0404	-0.0389
1.0356	1.0018	0.9627	-0.0305	-0.0282	-0.0357
1.0529	0.9491	0.998	-0.0029	-0.0722	0.0274
1.0422	0.9608	0.997	-0.0065	-0.0606	0.0186

1.0337	0.9506	1.0157	-0.0133	-0.0737	0.0034
1.0193	0.9628	1.0179	-0.0084	-0.0515	0.0004
1.0223	0.9678	1.0099	0.0015	-0.0652	-0.0011
1.0435	1.0078	0.9488	-0.0406	-0.0357	-0.0403
Js ₂					
k ₁₁	k ₂₂	k ₃₃	k ₁₂	k ₂₃	k ₁₃
1.00704	0.99861	0.99435	-0.00203	-0.0161	0.00751
1.00804	0.99281	0.99915	0.00107	-0.02518	0.00889
1.01414	0.97438	1.01147	-0.0222	-0.03484	0.01849
1.01279	0.98492	1.00229	0.00941	-0.01056	-0.00275
1.00684	0.99393	0.99924	0.0076	-0.00817	0.00017
1.06045	0.93297	1.00658	-0.01995	-0.02425	-0.02441
1.08752	0.90793	1.00455	-0.04386	-0.06329	-0.03632
1.0156	0.98014	1.00425	-0.00177	-0.00795	-0.01178
Js ₃					
k ₁₁	k ₂₂	k ₃₃	k ₁₂	k ₂₃	k ₁₃
0.99188	1.00215	1.00597	-0.02372	-0.03279	-0.01868
0.99177	0.99495	1.01329	-0.00865	-0.02217	-0.03264
0.98632	0.98332	1.03036	-0.02387	0.012	-0.01453
0.9939	0.98284	1.02326	-0.01666	0.00009	-0.02558
0.99823	0.97888	1.02289	-0.03332	0.00811	-0.0203
0.99279	0.98028	1.02693	-0.03155	0.00634	-0.01705
0.98182	1.00747	1.01071	-0.03431	-0.0243	-0.00348
1.00612	0.96914	1.02474	-0.01834	-0.00762	-0.02537
Js ₄					
k ₁₁	k ₂₂	k ₃₃	k ₁₂	k ₂₃	k ₁₃
0.9889	1.00419	1.0069	-0.06311	-0.05967	-0.05678
1.02389	0.94569	1.03043	-0.07117	-0.04579	-0.03303
1.03254	0.93218	1.03529	-0.05054	-0.04311	-0.03002
1.03794	0.88308	1.07899	-0.11229	-0.09224	-0.05503
1.01499	0.92876	1.05625	-0.09829	-0.06287	-0.05075
0.96882	0.99897	1.03221	-0.1052	-0.10773	-0.11853
0.99616	0.99879	1.00505	-0.07592	-0.06596	-0.08177
1.03188	0.92033	1.0478	-0.07439	-0.06729	-0.03477
Js ₅					
k ₁₁	k ₂₂	k ₃₃	k ₁₂	k ₂₃	k ₁₃
1.00567	0.99566	0.99867	-0.0334	-0.00869	-0.02183
1.01103	0.99052	0.99845	-0.04502	-0.01928	-0.02667
1.01694	0.98041	1.00265	-0.02416	-0.02092	-0.03038
1.02176	1.00245	0.9758	-0.0189	-0.0175	-0.01875
1.00857	0.98798	1.00346	-0.03354	-0.01337	-0.03306
1.01468	0.97738	1.00794	-0.01856	0.00085	-0.00728
1.00353	0.98756	1.00891	-0.0224	-0.01053	-0.03083
1.0265	0.97829	0.99521	-0.04386	-0.03066	-0.03904
Js ₆					
k ₁₁	k ₂₂	k ₃₃	k ₁₂	k ₂₃	k ₁₃
1.07821	0.88711	1.03468	0.05043	0.13645	-0.03119
1.05332	0.94263	1.00406	0.00756	0.05268	-0.01087
1.04805	0.95966	0.99229	0.00354	0.02743	-0.00284
1.17255	0.75905	1.06841	0.03497	0.2139	-0.00262
1.12607	0.7914	1.08253	0.0534	0.1845	-0.03274
1.05307	0.94354	1.00339	0.0054	0.0639	-0.01191
1.03814	0.92798	1.03388	0.00023	0.04403	-0.00653
1.17616	0.74119	1.08265	-0.02341	0.22669	0.00455
Js ₇					
k ₁₁	k ₂₂	k ₃₃	k ₁₂	k ₂₃	k ₁₃
1.07712	0.83737	1.08551	-0.08614	-0.07356	-0.03132
1.07763	0.93977	0.9826	-0.0562	-0.13429	-0.05116
1.03394	0.97988	0.98618	-0.02192	-0.03923	-0.02726
1.03098	0.86849	1.00053	-0.10947	-0.04927	-0.02238
1.00038	0.95698	1.04263	-0.08814	-0.0251	-0.01612
1.10266	0.84326	1.05408	-0.04619	-0.11686	-0.00576
1.04376	0.9198	1.03644	0.00886	-0.05486	0.00881
1.04882	0.8733	1.07788	-0.10909	-0.04596	-0.01381
Js ₈					
k ₁₁	k ₂₂	k ₃₃	k ₁₂	k ₂₃	k ₁₃
0.99682	1.00958	0.9936	-0.02216	-0.03546	-0.01172
0.99741	0.98533	1.01725	-0.0185	-0.02743	-0.03379
1.00872	0.98978	1.00149	-0.04233	-0.02119	-0.02659
1.00049	1.00577	0.99373	-0.03718	-0.01138	-0.02216
0.99609	0.97831	1.0256	-0.0191	-0.01945	-0.02366
1.01705	0.99744	0.98551	-0.00887	-0.01617	-0.03186

0.99732	0.99101	1.01167	-0.02823	-0.0106	-0.03701
1.00042	0.98321	1.01636	-0.01203	-0.01618	-0.02886
J_{S_9}					
k_{11}	k_{22}	k_{33}	k_{12}	k_{23}	k_{13}
1.02327	1.02946	0.94727	-0.01495	-0.03599	-0.05574
1.02315	1.01803	0.95882	-0.00924	-0.02058	-0.03151
1.02801	1.03572	0.93627	-0.03029	-0.03491	-0.06088
1.02775	1.00633	0.96591	-0.01635	-0.04148	-0.02006
1.02143	1.01775	0.96082	-0.02798	-0.04727	-0.02384
1.01823	1.01203	0.96975	-0.01126	-0.02833	-0.03649
1.01486	1.02067	0.96446	-0.01046	-0.01913	-0.03864
1.04596	1.01133	0.94271	-0.0166	-0.04711	-0.03636

Apéndice B: Alojamiento, instalación, documentación y manual.

El desarrollo y administración del presente código está alojado en la plataforma para el hospedaje de códigos, que permite la colaboración y control de versiones, denominada GitHub en el enlace <https://github.com/eamontoyaa/jelinekstat>. A través de este sitio se hace las respectivas descargas, aportes y peticiones de participación en el proyecto.

En la portada del repositorio de alojamiento y/o en la documentación se presenta la instrucción para la instalación del SA.

Allí podrá obtener un archivo comprimido .zip que contiene el programa y acceso a la documentación del mismo que a su vez funciona como manual del usuario. El manual del usuario puede ser estudiado en línea en el enlace <https://jelinekstat.readthedocs.io/> o en formato .pdf para descargar desde el enlace <https://media.readthedocs.org/pdf/jelinekstat/latest/jelinekstat.pdf>; en ambos casos se instruye paso a paso el procedimiento para lograr una ejecución satisfactoria del programa y/o sus funciones

Apéndice C: Listado del archivo de lotes

Este es el archivo de lotes mínimo que realiza todo el cálculo con las funciones desarrolladas en este trabajo. Se encuentra bajo el nombre de **shortSCR.py** en el directorio de ejemplos del SA.

El usuario puede ejecutarlo desde la consola del sistema operativo asignándole al intérprete de Python 3 la ejecución del archivo .py, desde el intérprete de Python 3 en consola línea a línea, desde un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, acrónimo del idioma inglés de *Integrated Development Environment*) creado para Python 3 o puede ser llamado por otro programa.

```
from jelinekstat.jelinekstat import tensorStat

# Input data.
sample = [
    [1.02327, 1.02946, 0.94727, -0.01495, -0.03599, -0.05574],
    [1.02315, 1.01803, 0.95882, -0.00924, -0.02058, -0.03151],
    [1.02801, 1.03572, 0.93627, -0.03029, -0.03491, -0.06088],
    [1.02775, 1.00633, 0.96591, -0.01635, -0.04148, -0.02006],
    [1.02143, 1.01775, 0.96082, -0.02798, -0.04727, -0.02384],
    [1.01823, 1.01203, 0.96975, -0.01126, -0.02833, -0.03649],
    [1.01486, 1.02067, 0.96446, -0.01046, -0.01913, -0.03864],
```

```
[1.04596, 1.01133, 0.94271, -0.01660, -0.04711, -0.03636]]
confLevel = 0.95

# Performing the calculation all in one function.
jelinekStatsSummary, stereonetPlot = tensorStat(
    sample, confLevel=0.95, want2plot=True,
    plotName='shortSCR', ext='pdf')
stereonetPlot.show()
```

Apéndice D: Licencia del programa

Los autores son miembros del Semillero de Geología Matemática y Computacional parte del Grupo de Investigación de Geotecnia de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín.

Copyright © 2018 en adelante, Universidad Nacional de Colombia.

Copyright © 2018 en adelante, Exneyder A. Montoya-Araque & Ludger O. Suarez-Burgoa

Este código abierto es software libre: usted puede redistribuirlo y/o modificarlo bajo los términos de la Licencia BSD, ya sea la versión 2 de dicha Licencia, o (a su elección) cualquier versión posterior. Consulte detalles en <https://opensource.org/licenses/BSD-2-Clause>.

Apéndice E: Descargo de responsabilidades

El presente código computacional se distribuye con la esperanza de que sea útil, pero sin ninguna garantía; sin la garantía implícita en su comercialización o idoneidad para un propósito particular. Consulte la Licencia BSD-2 para mayores detalles.

E.A. Montoya-Araque, es estudiante de la Maestría en Ingeniería - Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y graduado como Ing. Geólogo de la misma institución. Es Joven Investigador de Colciencias y desarrolla labores como ingeniero geólogo en proyectos de consultoría en ingeniería hace más de 2 años. Es desarrollador de software de aplicación en lenguajes intérpretes, tales como Python 3, R y MatLab/Octave, en temas relacionados a la geología aplicada y geotecnia habiendo producido herramientas como: jelinekstat y pyCSS. Hace parte del semillero de investigación en geología matemática del Grupo de Investigación de Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. ORCID: 0000-0002-6566-4962.

L.O. Suarez-Burgoa, es Dr. en Geotecnia de la Universidad de Brasilia (UnB), Brasil, MSc. en Ingeniería Geotécnica de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) y graduado como Ing. Civil de la Universidad Mayor de San Andrés de Bolivia (UMSA). Es profesor asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Minas de la UNAL en Medellín, Colombia. Desarrolló actividades como consultor e investigador por más de quince años en el campo de la geotecnia civil y minera en Bolivia, Chile, Brasil y Colombia, con énfasis en la mecánica de rocas. Actualmente es desarrollador de códigos computacionales en lenguajes intérpretes, tales como MatLab 11 (Octave 4.X) y Python3, en temas relacionados a la geología aplicada y geotecnia; habiendo producido herramientas como: jelinekstat, Buzy+, pyCSS, VolteoLab, GeonetDigitizer y SVG-stereographicPlot. Es director del semillero de investigación en geología matemática (www.geomecnica.org), parte del grupo de investigación de geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. ORCID: 0000-0002-9760-0277.

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



BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA No. 44

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

En Todográficas Ltda.

Medellín - Colombia

Emerging technologies for tailings disposal: opportunities for Colombian practice
Lorena N. Beltrán-Rodríguez, Joan M. Larrahondo & Diego Cobos

Identification, analysis and evaluation of risks associated with gold mining in Marmato, Caldas

Andrea Jimena Motta-Pascuas, Mario Alfonso Ustariz-Durán & Oswaldo Ordoñez-Carmona

Characterization of clays materials from Guaviare river, La Paz, Colombia
David Landínez, Martha Calvo & Carolina Cárdenas

Incorporation of random uncertainty of soil properties in geostatistic analysis.
Application to the reliability design of shallow foundations

Maddy Alejandra Munévar-Peña a, Alfonso Mariano Ramos-Cañón b & Luis Felipe Prada-Sarmiento

Application software in Python 3 for calculating the second-order tensors Jelínek's statistics in anisotropy of magnetic susceptibility data

Exneyder A. Montoya-Araque & Ludger O. Suarez-Burgoa

Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia
Lorena N. Beltrán-Rodríguez, Joan M. Larrahondo & Diego Cobos

Identificación, análisis y evaluación de riesgos asociados a la actividad minera de oro en el Municipio de Marmato, Caldas

Andrea Jimena Motta-Pascuas, Mario Alfonso Ustariz-Durán & Oswaldo Ordoñez-Carmona

Caracterización de material arcilloso obtenido del río Guaviare, vereda de La Paz, Colombia
David Landínez, Martha Calvo & Carolina Cárdenas

Incorporación de la incertidumbre aleatoria de las propiedades del suelo en la geoestadística. Aplicación al diseño de cimentaciones basado en confiabilidad

Maddy Alejandra Munévar-Peña a, Alfonso Mariano Ramos-Cañón b & Luis Felipe Prada-Sarmiento

Software de aplicación en Python 3 para el cálculo de la estadística de tensores de segundo orden de Jelínek en datos de anisotropía de susceptibilidad magnética

Exneyder A. Montoya-Araque & Ludger O. Suarez-Burgoa

