

BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

No. 41, Enero de 2017

ISSN 0120 - 3630



Inventory of the sites of geological interest, in the southwestern of Antioquia Colombia
Albeiro Rendón Rivera, Ángela María Henao Arroyave & Juan Guillermo Osorio Cachaya

TARIFA POSTAL REDUCIDA No. 2015-456 . 4-72
La Red Postal de Colombia, vence 31 de Dic. 2017



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS Y MEDIO AMBIENTE



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Número 41, Enero de 2017

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

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

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

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

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 2.

Artículo: Inventario de sitios de interés geológico en el suroeste Antioqueño Colombia

Autores: Albeiro Rendón-Rivera, Ángela María Henao-Arroyave & Juan Guillermo Osorio-Cachaya

Revista indexada en:

Índice Nacional de Publicaciones Seriadas Científicas y Tecnológicas de COLCIENCIAS - Publindex, en Categoría A2.

Georef

SciELO - Scientific Electronic Library Online

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

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

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

BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

ISSN 0120 - 3630

Periodicidad semestral: Julio y Diciembre

Tarifa Postal Reducida No. 2015-456 . 4-72 La Red Postal de Colombia, vence 31 de Dic. 2017

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 MARTÍN

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

Geomorphological characterization and mapping of Cartagena de Indias and adjacencies Max Furrier; Germán Vargas-Cuervo & Cristian Camilo Moncada	5
Characterization of weathering profiles of the crystal rocks of eastern Bucaramanga and definition of hydrogeological properties Juan Diego Colegial Gutierrez, Maria Camila Forero Quintero, María Alejandra Fuentes Rueda & Sully Gómez Isidro	16
Mathematization of geology Ludger O. Suarez-Burgoa	31
Geotechnical variations on a tropical soil produced by municipal solid waste leachate Alejandro Quintero Ramírez, Yamile Valencia González & Luis Augusto Lara Valencia	40
Petrography, geochemistry and geochronology of metamorphic rocks outcropping in San Francisco Putumayo and the Palermo-San Luis road associated with the La Cocha - River Tellez and Aleluya complexes Gilberto Zapata García, Gabriel Rodríguez García & María Isabel Arango Mejía	48
Inventory of the sites of geological interest, in the southwestern of Antioquia Colombia Albeiro Rendón Rivera, Ángela María Henao Arroyave & Juan Guillermo Osorio Cachaya	66
Tomography axial computerized technique application to improve Cuban oil fields seal and reservoir rocks characterization Lisset Miquel González Gilbert Ortiz Rabell & Olga Castro Castiñeira	73
NPV analysis as a function of the discount rate and cost of re-handling implementing SIMSCHED DBS to open pit mining Carolina Navia-Vásquez, María Camila Monsalve-Hinestroza & Giovanni Franco-Sepúlveda	81

Our cover
 Image alluding to Article:
 Inventory of the sites of geological interest, in the southwestern
 of Antioquia Colombia

Authors:
 Albeiro Rendón Rivera, Ángela María Henao Arroyave & Juan
 Guillermo Osorio Cachaya



CONTENIDO

Caracterización y mapeo geomorfológico de Cartagena de Indias y adyacencias Max Furrier; Germán Vargas-Cuervo & Cristian Camilo Moncada	5
Tipificación de perfiles de meteorización de rocas cristalinas al oriente de Bucaramanga y definición de propiedades hidrogeológicas Juan Diego Colegial Gutierrez, María Camila Forero Quintero, María Alejandra Fuentes Rueda & Sully Gómez Isidro	16
Matematización de la geología Ludger O. Suarez-Burgoa	31
Variaciones geotécnicas en un suelo tropical causadas por los lixiviados de residuos sólidos urbanos: Escala laboratorial Alejandro Quintero Ramírez, Yamile Valencia González & Luis Augusto Lara Valencia	40
Petrografía, geoquímica y geocronología de rocas metamórficas aflorantes en San Francisco Putumayo y la vía Palermo-San Luis asociadas a los complejos La Cocha – Río Téllez y Aleluya Gilberto Zapata García, Gabriel Rodríguez García & María Isabel Arango Mejía	48
Inventario de sitios de interés geológico en el suroeste Antioqueño Colombia Albeiro Rendón Rivera, Ángela María Henao Arroyave & Juan Guillermo Osorio Cachaya	66
Aplicación de la técnica de tomografía axial computarizada para mejorar la caracterización de las rocas sello y reservorio de los yacimientos petroleros cubanos Lisset Miquel González, Gilbert Ortiz Rabell & Olga Castro Castiñeira	73
Análisis del VPN en función de la tasa de descuento y el costo de remanejo implementando SIMSCHED DBS para una explotación minera a cielo abierto Carolina Navia-Vásquez, María Camila Monsalve-Hinestroza & Giovanni Franco-Sepúlveda	81

Nuestra carátula

Imagen alusiva al artículo:

Inventario de sitios de interés geológico en el suroeste
Antioqueño Colombia

Autores:

Albeiro Rendón Rivera, Ángela María Henao Arroyave
& Juan Guillermo Osorio Cachaya



Geomorphological characterization and mapping of Cartagena de Indias and adjacencies

Max Furrier ^a; Germán Vargas-Cuervo ^b & Cristian Camilo Moncada ^c

^a Departamento de Geociências, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil. max.furrier@gmail.com

^b Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. gvargasc@unal.edu.co

^c UT Estudios Ambientales – INERCO, Bogotá, Colombia, cmoncada@inerco.com

Received: June 03th, 2015. Received in revised form: March 1st, 2016. Accepted: May 7th, 2016.

Abstract

This work involves a geomorphological characterization of the topographic chart 23 III D, produced by IGAC, in which were developed thematic mappings and other cartographic products where the relief, both, in its morphology and its morphometric and spatial characteristics were the central theme. From the geomorphological point of view, the area in question is located on the Sinú Belt and the unconsolidated Quaternary sediments. Sinú Belt, which oldest geological formation is dated as Oligocene-Miocene, presents the highest altitudes in the mapped area reaching 146 meters in the Cerro La Popa. The lower levels of the relief in the area are the unconsolidated Quaternary deposits, which altitudes do not go over 20 meters. From mapping surveys, interpretation of orbital images, field observations and the integration of the interpretation obtained, it can be concluded that the Cenozoic tectonics is the most important setting factor in the morphological shape of the area.

Keywords: geomorphology; neotectonics; La Popa Formation.

Caracterización y mapeo geomorfológico de Cartagena de Indias y adyacencias

Resumen

Este trabajo abarca una caracterización geomorfológica de la hoja topográfica 23 III D, producida por IGAC, en que fueron elaborados mapeos temáticos y otros productos cartográficos donde el relieve, tanto en su morfología como en sus características morfométricas y espaciales constituyen el tema central. Desde el punto de vista geomorfológico, el área en cuestión se encuentra sobre el Cinturón del Sinú y sobre los sedimentos inconsolidados del Cuaternario. El Cinturón del Sinú cuya formación geológica más antigua es datada como Oligoceno-Mioceno, presenta las altitudes más elevadas en el área mapeada alcanzando 146 m en el Cerro La Popa. Los sectores más bajos del relieve del área son los depósitos cuaternarios inconsolidados, donde las altitudes no pasan los 20 m. A partir de levantamientos cartográficos, interpretaciones de imágenes orbitales, observaciones en campo y de la integración e interpretación obtenidas, se puede concluir que la tectónica cenozoica constituye el factor más importante en la configuración morfológica del área.

Palabras clave: geomorfología; neotectónica; Formación La Popa.

1. Introducción

El mapeo de zonas costeras en Colombia, en especial la franja caribeña, sin duda constituye una prioridad para la cartografía geológica de Colombia, pues dado el alto interés económico, social, y científico de dicha zona, se hace necesario iniciar un desarrollo sostenible apoyado en los

recursos naturales y en la instalación de nuevos proyectos industriales.

Sin embargo, la información geomorfológica ha sido utilizada tangencialmente con diferentes propósitos, en algunos casos únicamente con el objeto de cumplir un requisito de los informes geológicos y de ingeniería. No obstante lo anterior, la necesidad de llevar a cabo planes de ordenamiento territorial y planificación ambiental, así como

How to cite: Furrier, M., Vargas-Cuervo, G. & Moncada, C.C., Caracterización y mapeo geomorfológico de Cartagena de Indias y adyacencias. Boletín de Ciencias de la Tierra, (41), 5-15, 2017.



Figura 1. Localización del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

de conocer la estructura del relieve y no solamente sus formas superficiales, ha permitido vislumbrar el valor que tiene la geomorfología, no solo por la información que proporciona, sino también porque facilita la tarea de definir zonas morfoestructurales homogéneas y su mapeo [1].

El Caribe colombiano, que se encuentra en la convergencia entre las placas del Caribe y de Sudamérica, es un punto clave para entender la evolución geomorfológica de los márgenes continentales activos. Es importante tener en cuenta que las unidades geológicas, a que se refiere este trabajo, están establecidas en el lecho marino en relación con el margen de una provincia con basamento oceánico, y que, debido a la intensa compresión y flexión, surgieron como las conocemos actualmente. Por lo tanto, es imposible comprender la Geomorfología del área sin un conocimiento del génesis geológico y su litología.

Toto y Kellogg (1992) [2] afirman que el Cinturón del Sinú posee una cuña sedimentaria de hasta 12 km de espesor, y que éste es afectado por la convergencia entre las placas Caribe y Sudamericana, siendo que la baja sismicidad se explica por una baja tasa de desplazamiento entre las dos placas, diferente de lo que ocurre en el sector del Pacífico colombiano. Sin embargo, esta tasa de desplazamiento no puede ser desconsiderada en su reflejo en la morfología del relieve del área.

1.2. Área de estudio

El área de estudio se encuentra entre las coordenadas 1°650.000 N, 1°640.000 S, 850.000 W y 836.000 E, comprendiendo la hoja 23 III D [3], encontrándose en el sector central de la jurisdicción de la ciudad de Cartagena de Indias – Bolívar (Fig. 1).

El casco urbano de la ciudad se encuentra en su interior, ubicado alrededor de la Ciénaga la Virgen, y está rodeado por el Mar Caribe y la Bahía de Cartagena, en la porción externa. El área posee un clima tropical seco con temperatura media de 29°C, con algunas variaciones locales y lluvias anuales de 900 mm. Los vientos más fuertes se presentan de diciembre a abril debido a la influencia de los alisios del norte, con dirección predominante del cuadrante norte [3].

Cartagena de Indias posee una población total de 1.013.454 habitantes, siendo que 971.700 viven en el casco

urbano [4]. Principal ciudad turística de Colombia y Patrimonio Cultural de la Humanidad por UNESCO.

1.3. Breve contextualización geológica y tectónica

La ciudad de Cartagena de Indias y alrededores se encuentra predominantemente ubicada sobre sedimentos cuaternarios, comprendidos por depósitos de llanura costera, y depósitos de playa. Adicionalmente, en la ciudad se encuentran afloramientos de la Formación La Popa que reposa de forma discordante sobre la Formación Bayunca del Plioceno [5] (Fig. 2).

A la Formación Bayunca se le atribuye un origen en una zona entre costa afuera y plataforma continental. Sus características de sedimentación muestran también sedimentos formados en una zona intermareal, afectada por canales con abundante concentración de conchas y en otras partes areniscas relleno de canales abandonados con contactos erosivos [6]. En detalle de campo se observa también estratificación ondulosa paralela que puede ser completamente borrada por la alta bioturbación.

Suprayaciendo la Formación Bayunca de forma discordante se encuentra la Formación La Popa del Pleistoceno Superior. El término Formación La Popa, se utilizó para describir rocas expuestas en el Cerro La Popa en Cartagena [5]. Para hacer referencia al miembro inferior, se utilizó el término unidad detrítica de La Popa, y al superior, el término calizas arrecifales de La Popa [7].

Para la Formación La Popa se advierte la existencia de está conformada por arrecifes formados en una plataforma submarina con una pendiente muy suave y por debajo del nivel de base de las olas, en un área con poco aporte de sedimentos terrígenos, aguas claras y temperaturas entre 21° y 25° C que permiten el desarrollo de arrecifes coralinos [2]. São rocas muy porosas y con densidad muy baja.

Los depósitos de llanura costera (Qlc) forman áreas planas al nordeste del casco urbano de Cartagena y gran parte de sus cursos de agua convergen en la Ciénaga de la Virgen. Dichos depósitos de llanura presentan un régimen de depósito progradante y origina la formación de depósitos orgánicos y clásticos. Los depósitos orgánicos son principalmente los manglares y los depósitos clásticos se consideran las arenas y arcillas depositadas y retrabajadas.

Los depósitos de playas (Qmp) están localizados a lo largo de la línea de costa y constan de arenas de grano fino a grueso, ocasionalmente con gravas; siendo la mayoría de color amarillo ocre a gris. Estos depósitos poseen un alto contenido de carbonato comprobado *in loco* por la reacción con ácido de cloruro. Su área geográfica de mayor exposición es a lo largo de la línea de costa del área de estudio densamente ocupada por una urbanización desprovista de cualquier tipo de planificación u ordenamiento territorial.

En menor proporción se encuentran los depósitos coluvio-aluviales (Qcal) que agrupan la sedimentación fluvial reciente y actual, y la generada por coluviones igualmente recientes, relacionados con arroyos y con los piedemontes. Están constituidos por cantos, bloques, arenas y arcillas, mezclados agradados, y cubren a las unidades rocosas y a los depósitos cuaternarios a sudeste del área.

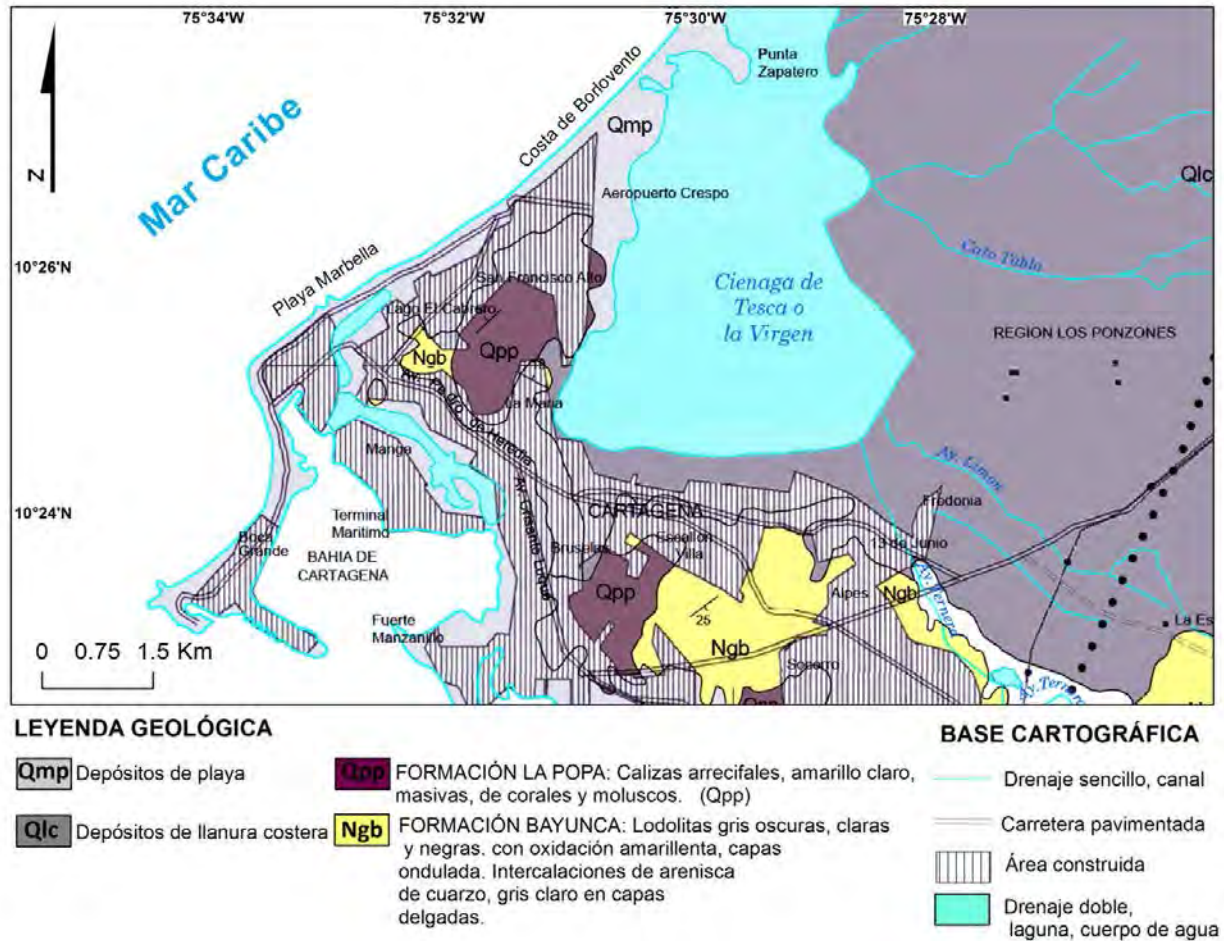


Figura 2. Plancha geológica del área de estudio.
Fuente: adaptado de [8].

En el Cinturón del Sinú, muchas estructuras de deformación presentes son producto del efecto de diapirismo de lodo, lo que genera algunos anticlinales y recientes esfuerzos tectónicos compresivos verificados en campo. Muchas anticlinales en la Formación Bayunca, observadas en campo, corroboran la existencia de una tectónica reciente. También fueron observadas en campo fallas inversas y normales asociadas a la neotectónica.

Las estructuras con deformaciones cenozoicas registradas en la Plancha Geológica de Cartagena [6], debido a la escala de mapeo original 1:100.000, son demasiado genéricas, por tanto, sólo las más significativas e importantes fueron descritas en tal plancha. Estudios pormenorizados a través de trabajos de campo detallados, indican que las estructuras de deformaciones son mucho más amplias y comunes, siendo encontradas en altas cantidades tanto en la Formación Bayunca, así como en la Formación La Popa, con una influencia visible e inconfundible sobre el relieve del área y su desarrollo.

2. Fundamentación teórica y metodológica

Inicialmente fue efectuada una recolección detallada de la bibliografía sobre los temas abordados y sobre el área de estudio, posibilitando la revisión de literatura existente para un mejor desempeño de la investigación. Los temas que fueron abordados en esta investigación fueron: geología, geomorfología y neotectónica. Todos los temas fueron manipulados mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Sin embargo, la literatura encontrada sobre el área es demasiado pobre.

El material cartográfico producido en este trabajo fue elaborado con la ayuda del software ArcGis® versión 10.2.1. Todos los productos cartográficos elaborados fueron generados a partir de curvas de nivel extraídas de una imagen Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) con resolución de 30 m, escala 1:100.000 con distancias entre las curvas de nivel de 10 m. El sistema de coordenadas utilizado fue el Universal Transversa de Mercator (UTM) Zona 18 Norte y el datúm Sirgas2000.

Fue generado un Modelo Numérico del Terreno (MNT) con la ayuda del *software* ArcGis® versión 10.2.1 y a partir de éste fueron elaboradas la plancha de inclinación de las pendientes y la plancha geomorfológica, además del perfil topográfico. El análisis de esos productos cartográficos fue de vital importancia para la elaboración de este trabajo, pues permitió observar varias discrepancias topográficas en el relieve y diferentes niveles de inclinación de las pendientes en el área. Estas observaciones refuerzan el control morfoestructural y morfotectónico de la configuración actual del relieve, y adicionalmente proporcionan datos cuantitativos inéditos sobre el área que pueden subsidiar otros trabajos futuros.

Análisis morfométricos y MNT son modelos matemáticos computacionales del relieve que presentan gran aplicación, también, en estudios morfotectónicos y morfoestructurales y pueden ser obtenidos a partir del procesamiento de planchas topográficas, fotografías aéreas y más recientemente datos de radar SRTM [9].

2.1. Elaboración de la plancha de inclinación de las pendientes

La plancha de inclinación de las pendientes proporciona información morfométrica sobre el relieve, siendo ésta la base para identificar y cuantificar pendientes, terrazas y planicies de inundación. En términos generales, el modelo ha demostrado ser muy satisfactorio y útil, sobre todo en zonas donde el relieve es accidentado [10]. La plancha de inclinación de las pendientes demuestra ser objeto de análisis casi obligatorio en trabajos relacionados con la planeación ambiental y territorial además de la investigación de la tectónica reciente [11].

De Biasi (1970) [12] y Christofolletti (2007) [13] afirman que la plancha de inclinación de las pendientes es de gran importancia en trabajos de Ciencias de la Tierra que se dedican al planeamiento de zonas urbanas, agrarias y de suelos, puesto que es una representación gráfica de la inclinación de las pendientes y de zonas homogéneas del terreno. Esto mejora la comprensión y entendimiento de los problemas asociados al espacio analizado.

Por medio de la generación de la matriz regular e irregular a partir de las curvas de nivel, como se explicó anteriormente, se procede a generar la plancha de inclinación de las pendientes. Para su elaboración, se ha seleccionado la extensión *spatial analyst tools* en la pestaña *Surface*, herramienta *slope*. Para este trabajo, con fines analíticos, se ha tomado la siguiente clasificación de pendientes propuesta por la *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária* de Brasil (EMBRAPA) [14].

- Llano – superficie de topografía tenue u horizontal, donde los desniveles son muy bajos, con declividades $\leq 3\%$.
- Ligeramente inclinado – superficie de topografía poco ondulada, constituida por un conjunto de colinas y/o bajos cerros (elevaciones de altitudes relativas hasta 50 m y de 50 hasta 100 m, respectivamente), presentando declives poco inclinados variando de $> 3\%$ a $\leq 8\%$.
- Inclinado – superficie de topografía poco ondulada, constituida por conjunto de colinas y/o bajos cerros,

presentando declives moderados, predominantemente variando de $> 8\%$ a $\leq 20\%$.

- Fuertemente inclinado – superficie de topografía ondulada, formada por colinas y/o cerros (elevaciones de 50 a 100 m e de 100 a 200 m de altitudes relativas, respectivamente) con declives fuertes, predominantemente variando de $> 20\%$ a $\leq 45\%$.
- Montañoso – superficie de topografía vigorosa, con predominio de formas accidentadas, usualmente constituidas por cerros, montañas, macizos montañosos y lineamentos montañosos, presentando desniveles variables de $> 45\%$ a $\leq 75\%$.
- Escarpado – áreas con predominio de formas abruptas, comprendiendo superficies muy abruptas y escarpadas, tales como: cuestas, acantilados, pendientes con inclinación muy fuerte, usualmente ultrapasando 75% .

2.2. Perfil topográfico

Según Guerra y Guerra (2006) [15], el perfil topográfico es una representación de la superficie de la corteza terrestre que muestra una sección transversal a lo largo de un camino elegido. Por lo general, sigue siendo la misma escala, pero la escala vertical es exagerada para mejorar la visualización. Cuando se agregan las informaciones geológicas a los perfiles topográficos, el producto final obtiene una mayor importancia porque se pueden comparar, con una buena precisión, las formas del relieve con el basamento rocoso.

Para Fitz (2008) [16], el perfil topográfico muestra de una manera bastante fiable las características del relieve, proporcionando así una mejor comprensión de la superficie trabajada. El mismo autor también menciona que la preparación de los valores de los perfiles topográficos puede ser adquirida de forma manual, sin pérdida de precisión en los resultados. Por lo tanto, se decidió elaborar el perfil automáticamente, a través de los contornos obtenidos de las curvas de nivel generadas a partir de la imagen SRTM, trazando las líneas del perfil mediante la herramienta *Interpolate Line*, que crea un trazo 3D por interpolación de altitud a partir de una superficie funcional seleccionada. Después, con ayuda de la plancha geológica [8] fueron incluidas las informaciones litológicas.

El primer paso fue elegir la línea del perfil de aplicación. Se trazó un segmento que fue elegido en la dirección NW – SE. La elección de esta línea de perfil se basa en la plancha geológica, donde se buscó abarcar las principales formaciones geológicas y geomorfológicas, principalmente el Cerro La Popa, y así, obtener una correlación fidedigna entre la geología, la morfología del relieve y su topografía. Para la elaboración del perfil topográfico fue usado el *software* ArcGis® versión. 10.2.1. Para una visualización más adecuada del perfil, el mismo fue generado con una exageración vertical de 5 veces en relación a su longitud.

2.3. Elaboración de la plancha geomorfológica

Una de las funciones básicas de la geomorfología es mapear el relieve para desentrañar el modelado de su

estructura y a partir de allí, establecer las características que dieron origen a las formas del relieve actual. De esta forma, explicar las características de la superficie terrestre constituye el objeto de estudio de la geomorfología [17].

Teniendo en cuenta lo anterior, la cartografía geomorfológica es una importante herramienta en el estudio del relieve, pues en el mapa geomorfológico se traducen y sintetizan varias metodologías y los resultados de las respectivas investigaciones [18]. El mapa geomorfológico no puede solo describir las formas del relieve sin incluir, o subestimar, el basamento rocoso que sostiene las formas del relieve.

Penck (1953) [19] identificó que las actuales formas del relieve terrestre son resultados de dos fuerzas opuestas que actúan simultáneamente en todo el proceso de formación, estas fuerzas son denominadas endógenas y exógenas. Las primeras son originadas en la dinámica interior de la Tierra, mientras que las segundas comprenden los fenómenos atmosféricos como lluvias, vientos, variaciones en la temperatura y la acción química y física del agua, que, sumados a los agentes biológicos y antrópicos, dan como resultado formas del relieve.

Siguiendo los conceptos de Penck (1953) [19], Mescerjakov (1968) [20] estableció una clasificación del relieve terrestre en tres categorías genéticas principales necesarias en el análisis geomorfológico y su comprensión. Estas categorías se denominan geotextura, morfoestructura y morfoescultura.

Ross (1992) [21], basado en los conceptos metodológicos de Penck (1953) [19] y Mescerjakov (1968) [20], citados anteriormente, tomó como parámetros de clasificación la forma y alcance de cada unidad taxonómica. De esta forma el autor estableció seis niveles taxonómicos, siendo estos: morfoestructura, morfoescultura, patrón de forma del relieve, tipo de forma del relieve, tipos de vertientes y formas de procesos naturales actuales y antrópicos.

El primer taxón corresponde a la definición de morfoestructura presentada anteriormente, al igual que el segundo taxón referido representa la definición de morfoescultura. El tercer taxón está dado por las unidades de los patrones de formas semejantes de relieve o patrones de tipos de relieve. En éste taxón es donde los procesos morfoclimáticos actuales comienzan a ser bien percibidos. Esas unidades menores presentan diferencias entre sí, como la rugosidad topográfica o índice de disección del relieve. Los patrones de relieve pueden ser formas de acumulación, como planicies fluviales, marinas o intermareales (manglares), o denudacionales como colinas, cerros, mesetas, entre otros [18].

Esas unidades son representadas en el mapa geomorfológico por medio de un conjunto de letras mayúsculas y minúsculas. Las letras mayúsculas indican que los patrones se formaron por denudación (letra D) o por acumulación (letra A) y las minúsculas representan las formas generadas, como por ejemplo Dm (Denudación en forma de mesetas) o Apf (Acumulación en formas de planicie fluvial.) (Cuadro 1).

Cuadro 1.

Patrones de formas de relieve.

Formas de Denudación	Formas de Acumulación
D – DENUDACIÓN	A – ACUMULACIÓN
Da – Formas con ápices aguzados	Apf – Formas de planicie fluvial
Dc – Formas con ápices convexos	Apm – Formas de planicie marina
Dm – Formas en mesetas	Apl – Formas de planicie lacustre
De – Formas de escarpes	Api – Formas de planicie intermareal
Dv – Formas de vertientes	Ad – Formas de campos de dunas
	Atf – Formas de terraza fluvial
	Atm – Formas de terraza marina

Fuente: Adaptado de [21].

Los patrones de forma del relieve están acompañados de un conjunto de algoritmos arábigos de acuerdo con una matriz previamente elaborada, cuyas columnas indican tanto el grado de incisión de los valles y las líneas, como la dimensión interfluvial media (Cuadro 2). Las formas agradacionales no reciben los algoritmos arábigos pues no representan disección por procesos erosivos.

De manera general esos patrones se caracterizan por diferentes intensidades de disección de relieve por influencia de los cursos de agua temporales y permanentes [21]. Para calcular el índice de disección del relieve se debe considerar la incisión media de los valles y la dimensión interfluvial media. (Cuadro 2). Ross (1992) [21], resalta que el menor valor numérico de la disección más débil será 11 y el mayor valor numérico de la disección más fuerte será 55.

El cuarto taxón en orden decreciente se caracteriza por los tipos de formas de relieve individuales dentro de cada patrón de formas del relieve. Pueden ser tanto las de denudación, resultantes por desgaste por procesos erosivos (colinas, cerros y crestas), como las de gradación (planicies lacustres, fluviales y marinas). Los tipos de forma de relieve presentan semejanzas entre sí, tanto en su morfología como en su morfometría, es decir, en la forma y tamaño.

La representación cartográfica del cuarto taxón (tipos de forma del relieve) se hace en conjunto con la representación del tercer taxón (patrones de formas del relieve). Así, por ejemplo, un patrón de formas del relieve tipo Dc 23 es constituido por relieve denudacional de ápices convexos con incisión débil de 20 a 40 m y dimensión interfluvial media de 300 m a 700 m.

Para ser calculadas las incisiones fluviales es imprescindible considerar la estructura geológica/geomorfológica regional y la jerarquización de la red de drenaje. Para las zonas de cordillera y cinturones plegados como el Cinturón de San Jacinto, las incisiones fluviales que dan la dimensión real del relieve regional, son medidas en ríos de 4^{to} o mayor orden fluvial. En el caso de las bajas mesetas, los ríos de 3^{er} orden son incisiones fluviales que pueden ser suficientes para la jerarquización y caracterización de los patrones de las formas del relieve.

Cuadro 2.

Matriz de los índices de disección del relieve.

DIMENSIÓN INTERFLUVI AL MEDIA (clases)	MUY GRAND E (1) >1.500 m	GRAND E (2) 1.500 a 700 m	MEDI A (3) 700 m a 300 m	PEQUEÑ A (4) 300 a 100 m	MUY PEQUEÑ A (5) < 100 m
INCISIÓN MEDIA DE LOS VALLES (clases)					
MUY DÉBIL (1) < 20 m	11	12	13	14	15
DÉBIL (2) 20 a 40 m	21	22	23	24	25
MEDIA (3) 40 a 80 m	31	32	33	34	35
FUERTE (4) 80 a 160 m	41	42	43	44	45
MUY FUERTE (5) >160 m	51	52	53	54	55

Fuente: [21]

El quinto taxón, que corresponde a los tipos de pendientes, es formado por las pendientes o sectores de las pendientes que componen los tipos de formas del relieve individualizados. Una pendiente o un mismo sector de pendiente son individualizados por las características geométricas, genéticas y dinámicas.

Debido a las dimensiones o aspectos de sus propios sectores, el quinto taxón solo puede ser representado cartográficamente en grandes escalas mayores o iguales a 1:25.000. Tipos de formas del relieve individuales son representados por letras símbolo, como Ve (vertiente escarpada), Vc (vertiente convexa), Vcc (vertiente cóncava), Vr (vertiente rectilínea), Ac (ápices convexos), Ap (ápices planos), entre otros. Debido a la escala de este trabajo, el quinto taxón se analizará a través del perfil topográfico elaborado.

El sexto taxón, representa las menores formas mapeables. Son formas producidas por los procesos erosivos o deposicionales actuales. Como ejemplo de éste taxón pueden ser citadas formas causadas por agentes naturales, tales como hondonadas, cárcavas, surcos, cicatrices de deslizamientos, bancos de sedimentación actuales y las formas antrópicas como: cortes, nivelación por acción antrópica y canteras entre otros.

La representación cartográfica del sexto taxón tiene los mismos problemas que presenta el quinto taxón, es decir, sólo puede ser representada en escalas grandes, por tanto, la fotografía aérea e imágenes satelitales de alta resolución son herramientas indispensables. Su representación cartográfica, en los casos en que es posible, se hace por símbolos estandarizados.

Demek (1967) [22], es consciente de la importancia de la cartografía geomorfológica y consecuentemente destaca la importancia del color en un mapa geomorfológico, teniendo en cuenta que para cada color, hay dos posibilidades de expresión, a saber: el propio color y sus diferentes matices. El autor también aborda el problema de la escala en la que se representa el mapa geomorfológico. Por lo tanto,

dependiendo de la escala adoptada, es necesario generalizar la cartografía. En la representación cartográfica, cada unidad morfoestructural se indica mediante una familia de colores, como el verde o el rojo, por ejemplo. Cada variación del tono de estos colores indica una unidad morfoestructural.

La plancha geomorfológica del área de estudio fue elaborada con base en la metodología propuesta por Ross (1992) [21], que es una evolución metodológica desarrollada en el proyecto RADAMBRASIL, con adaptaciones hechas por Furrier (2007) [18] para mapeo en áreas exclusivamente sedimentarias con predominio de mesetas bajas. Su elaboración tuvo como base cartográfica y litológica la plancha geológica Cartagena [8], y la plancha de inclinación de las pendientes.

Para delimitar el primer taxón, correspondiente a las morfoestructuras, fueron consideradas las informaciones geológicas presentadas por IGEOMINAS (2001) [6]. En este sentido fueron establecidas 4 morfoestructuras: el Cinturón del Sinú, los depósitos coluvioaluviales, los depósitos de llanura costera y los depósitos de playa. Los depósitos de llanura costera (Qlc) y los depósitos coluvioaluviales (Qcal) fueron cartografiados. Los depósitos de playas (Qmp) fueron considerados una morfoestructura distinta por ser su génesis y composición completamente diferentes de los otros depósitos sedimentarios consolidados descritos anteriormente y, también, por su importancia ya que existen procesos erosivos intensos en el área de estudio.

Debido a la gran aplicabilidad de la metodología expuesta, la misma está siendo ampliamente utilizada en otros trabajos, incluyendo el mapeo geomorfológico del Estado de São Paulo [23] y del Estado de Paraná [24], dos importantes estados de Brasil. Esta metodología de mapeo geomorfológico está siendo difundida en diversas regiones de Brasil, y utilizada en varios artículos científicos, pues proporciona las herramientas para comprender fácilmente el mapa final que posee una amplia gama de información registrada en su leyenda integrada. Adicionalmente, cabe resaltar que el mapa final no solo demuestra la morfología sino que también es un producto morfométrico. Lo anterior hace que esta metodología sea adecuada para el desarrollo de la cartografía propuesta para el presente trabajo, pues el desarrollo del mismo permite comprobar la aplicabilidad tal metodología en un área adyacente a un Margen Continental Activo.

3. Resultados y Discusiones

En la presente sección serán presentados inicialmente los resultados referentes al material cartográfico producido. Los productos cartográficos elaborados y analizados son la plancha de inclinación de las pendientes y la plancha geomorfológica, además del perfil topográfico elaborado con la litología correspondiente. Estos productos fueron analizados de manera cualitativa y cuantitativa siempre relacionando la morfoestructura y la tectónica del área, debido a que son el marco que sustenta las formas del relieve que se encuentran en constante cambio por las fuerzas exógenas.

3.1. Plancha de inclinación de las pendientes

Con relación a la inclinación de las pendientes, el área de alcance de la hoja 23 III D presenta una topografía relativamente plana, con predominio de valores de inclinación de las pendientes de $< 3\%$, como se puede observar en la plancha de inclinación de las pendientes (Fig. 3). En general, esa clase de pendiente abarca el 62,99% del área de estudio.

Las pendientes $< 3\%$ son verificadas en los depósitos sedimentarios cuaternarios, pues los mismos son productos de la deposición actual y continúa, debido a que esas áreas están constantemente sometidas a inundaciones por sus bajas altitudes y por la dinámica marina actual, en las Terrazas y Planicies Marinas. Grande parte del casco urbano de Cartagena está situado sobre las Terrazas y Planicies Marinas y sobre las Terrazas y Planicies Costeras. Las primeras bajo la influencia actual del mar y las segundas bajo la influencia actual de inundaciones por lluvias. Sus delimitaciones geográficas son, actualmente, imposibles de hacer, debido a la intensa urbanización del área. Por lo tanto, la delimitación de estas dos unidades geomorfológicas fue basada, exclusivamente, en la plancha geológica de Cartagena [8].

Las pendientes más elevadas fueron verificadas en el sector oeste del área de estudio, principalmente en las pendientes del Cerro La Popa, en su porción sureste, donde

se observa, también, grandes movimientos de ladera y ocupación humana en el sopé de la pendiente (Fig. 4).

El Cerro de La Popa, en su sector noroeste, presenta una amplia pendiente con declividad menos elevada, pero es nítido que es una pendiente ampliamente fallada, formando escalones muy bien visibles (Fig. 5).

En campo, se puede determinar una relación sobresaliente entre una pendiente con una elevada inclinación y un salto de falla en la Formación La Popa, corroborando así que la relación, pendiente *versus* tectónica reciente, puede ser probada en el área y, por tanto, no se puede desconsiderar esto en estudios geomorfológicos. Otra relación determinada en campo es la relación movimiento de ladera *versus* pendiente elevada, que también apunta a indicar que los movimientos de ladera recientes son más comunes en pendientes con alta declividad, pero también acentúan aún más el grado de inclinación de la propia pendiente.

3.2. Caracterización geomorfológica

Con base en la construcción y análisis de la plancha geomorfológica (Fig. 6), fueron individualizadas cuatro morfoestructuras para el área de estudio. Las morfoestructuras identificadas son: Cinturón del Sinú, depósitos de llanura costera, depósitos coluvioaluviales y depósitos de playa. Las morfoestructuras fueron subdivididas en cuatro morfoesculturas

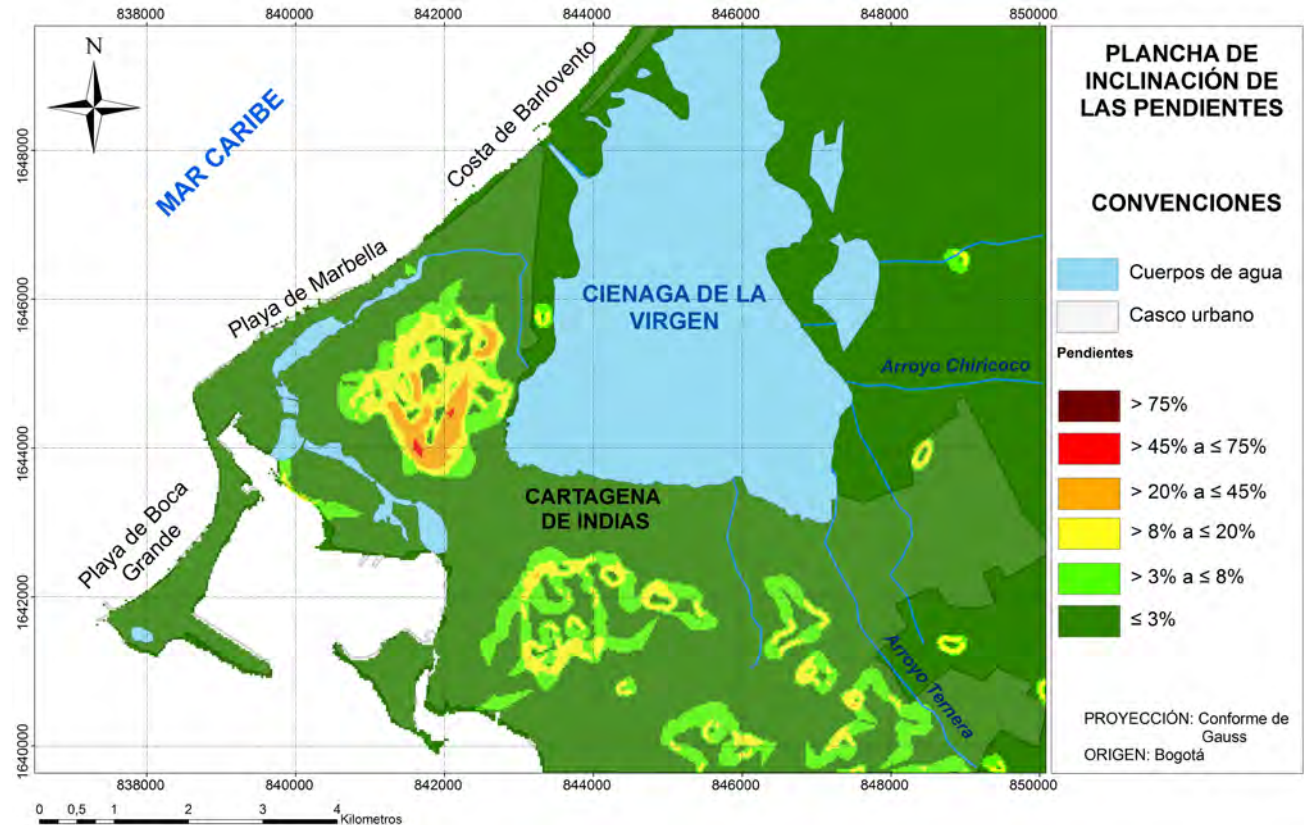


Figura 3. Plancha de Inclinación de las Pendientes
Fuente: Elaboración propia



Figura 4. Cerro La Popa con su pendiente con la mayor declividad. Observar movimientos de ladera.

Fuente: Elaboración propia



Figura 5. Cerro La Popa con su pendiente noroeste. Observar un escalón debido a una falla normal.

Fuente: Elaboración propia

que se constituyen en una jerarquía menor. Las morfoesculturas identificadas son: Cerros Testimonios del Sinú, Terrazas y Planicies Coluvioaluviales, Terrazas y Planicies Costeras y Terrazas y Planicies Marinas. Por cuestión de escala de trabajo, es imposible delimitar correctamente una planicie de una terraza. Así, en este mapeo las dos morfologías fueron juntadas.

La mayor variedad de patrones de forma de relieve fue verificada en la morfoescultura Cerros Testimonios del Sinú. En esta morfoescultura fueron encontradas tanto formas con ápices convexos como formas en mesetas de entalle medio de los valles y dimensión interfluvial media de diversos tamaños. La morfología más pronunciada y de ápices convexos (Da 42), es el caso del Cerro La Popa, en el casco urbano de Cartagena. Esta gran variedad de patrones de forma de relieve encontrado en esta morfoestructura está relacionada con las diferentes litologías (Formación Bayunca y La Popa) presentes y con el factor tectónico, ya que no hay manera de explicar tal variación en las formas del relieve por el factor climático exclusivamente, pues el área posee una dimensión geográfica pequeña donde no hay una variación climática notable que tenga la capacidad de esculpir formas distintas en las mismas litologías (Fig. 6).

Estas variaciones morfológicas encontradas en la Formación La Popa no se pueden explicar sin una influencia tectónica

notable y reciente. Además de la morfología anormal, estructuras geológicas tales como fallas y fracturas fueron ampliamente verificadas *in loco* en esta formación, lo que reafirma la fuerte influencia tectónica en el desarrollo de estos relieves.

El relieve agradacional formado por las Terrazas y Planicies Costeras presenta un área baja con altitudes máximas de 20 metros en su extremo oriente y altitudes mínimas de 5 m en las proximidades con la Ciénaga de la Virgen. Esta variación altimétrica puede ser considerada elevada, pues se trata de un área agradacional cuaternaria, de pequeña longitud y con inclinación en dirección E – O. La falta de estudios geológicos más detallados impide una descripción geomorfológica más precisa.

Las Terrazas y Planicies Costeras localizadas en el área de estudio están densamente pobladas en todo el casco urbano de Cartagena y en las áreas adyacentes, ocupación que se expande hacia el norte, siguiendo la autopista Cartagena – Barranquilla. Lo anterior dificulta sobre manera la correcta delimitación de la morfología delimitada como las Terrazas y Planicies Costeras. Hay en casi toda la franja costera del casco urbano de Cartagena obras de ingeniería costera para minimizar o impedir la erosión de las playas. No siendo la geomorfología costera el foco central de este trabajo, para una correcta interpretación de esos procesos de erosión costera sería necesario un análisis más preciso sobre el tema, sin embargo una caracterización actual fue hecha.

Sin embargo, es de conocimiento general que gran parte de la erosión costera en el mundo es debido al déficit sedimentario, y no por una elevación del nivel marino como ha sido incorrectamente difundido. En el área de estudio, es notable que los sedimentos son atrapados por las más diversas obras de ingeniería, principalmente el Guía Corriente construido para extravasar las aguas de la Ciénaga de la Virgen. Al norte de esta área no se verifica ninguna erosión costera, no obstante lo cual al sur, se construyeron varias obras para minimizar o impedir la fuerte erosión (Fig. 7).

Como los vientos son predominantemente del cuadrante norte (10°), la deriva de corriente costera en el área posee dirección NE – SW debido la morfología del litoral. Esta también es por tanto la dirección de los sedimentos de playa carreados por la deriva de corriente costera. Es notable, una fuerte erosión costera en toda orla de Cartagena, después del Guía Corriente en dirección a SW, ocasionando serios procesos erosivos en las playas de Marbella y Boca Grande.

Desde del Guía Corriente, hasta el final de la Playa de Boca Grande se observó 8,9 km de playas con obras de ingeniería para mitigar o impedir la acentuada erosión costera. Los principales tipos de estructuras de ingeniería son los quiebra mares (estructuras paralelas a la línea de costa) y los muelles (estructuras perpendiculares a la línea de costa).

Estas estructuras son todas constituidas por bloques de la Formación La Popa, por lo tanto, no son las más adecuadas debido a la densidad de las rocas calizas, su porosidad e inestabilidad química. Para este tipo de obra costera, la literatura apunta para rocas ígneas o metamórficas de densidades elevadas y masivas.

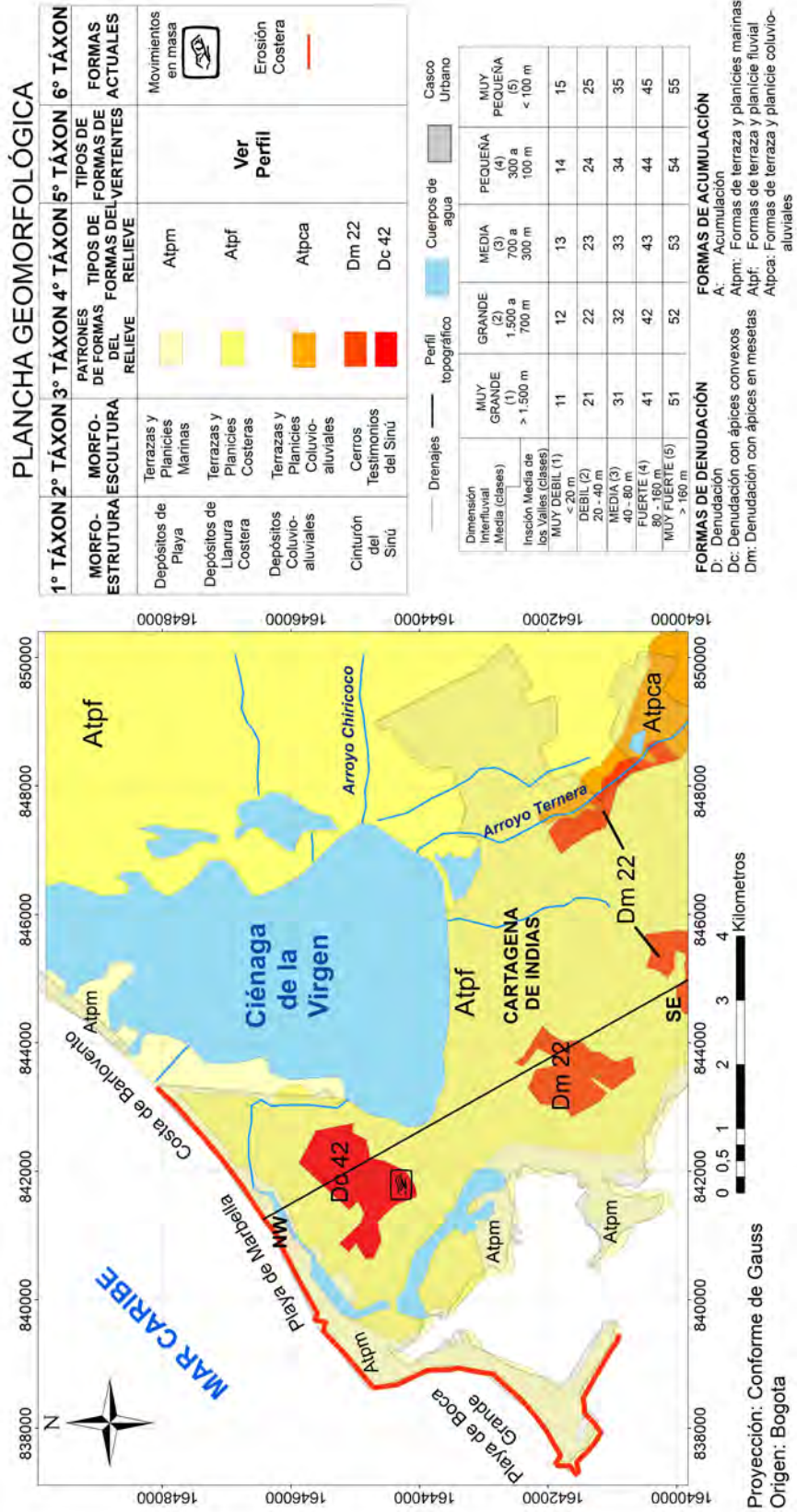


Figura 6. Plancha geomorfológica
Fuente: Elaboración propia



Figura 7. Canal de salida de agua de la Ciénaga de la Virgen con un Guía Corriente en la desembocadura atrapando los sedimentos.
Fuente: Adaptado de ArcGis Mape Base 2015.

3.2.1. Perfil topográfico

Conforme explicado en el ítem – fundamentación teórica metodológica – se decidió describir el 5º taxón en un perfil topográfico con la litología correspondiente que representase una gama importante de morfologías en el área y así no llenar la plancha geomorfológica con más datos que podrían afectar la asimilación del lector.

En el perfil topográfico con la respectiva litología, se muestra con total claridad la influencia tectónica tanto sobre la geomorfología del área como sobre las formas del relieve y sus respectivas pendientes (Fig. 8).

En el Cerro La Popa, principal morfología del área, muestra en su sector noroeste, que la pendiente es mucho más amplia, con presencia de fallas, escalonamientos e inclinaciones más bajas, no ultrapasando 20%. En su sector SE, la pendiente es mucho más escarpada, casi rectilínea y con presencia de movimientos de ladera. La inclinación de este sector es mucho más grande, con declividades entre 45 y 75% y también se encuentran fallas y fracturas en la Formación La Popa.

Siguiendo hacia Sureste, se encuentra una terraza densamente urbanizada hasta llegar a mesetas bajas sostenidas por la Formación La Popa. Continuando en dirección a Sureste, se encuentra una terraza sobre la Formación Bayunca y después una colina de baja altitud sostenida por la Formación La Popa.

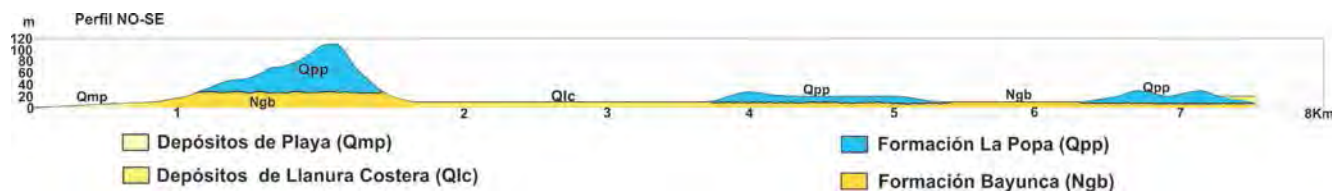


Figura 8. Perfil topográfico NO – SE
Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

La propuesta principal de este trabajo, que es la de una caracterización y mapeo geomorfológico, implicó un exhaustivo levantamiento bibliográfico y cartográfico de investigaciones previas realizadas en el área de estudio, además de un extenso trabajo de campo. Al mismo tiempo, se percibió que, dado el carácter pretérito disponible, en este momento, una caracterización geomorfológica de detalle es una tarea imposible. La integración de los datos obtenidos, levantados, producidos, analizados y discutidos resultó en una visión amplia e inédita del área objeto de estudio, siendo posible visualizar como la geología y la tectónica se integran con la geomorfología.

Para dar inicio a una caracterización geomorfológica fue imprescindible un sólido levantamiento geológico, tectónico y estructural del área, que implicó la consulta de fuentes bibliográficas producidas hace más de 40 años así como las publicadas más recientemente. Dicha investigación bibliográfica mostró la evolución de las ideas acerca de la geología del área objeto de estudio, no obstante lo cual, proporcionó pocos datos sobre la geomorfología, principalmente en escala de detalle.

La caracterización geomorfológica fue enfáticamente basada en los aspectos estructurales y tectónicos, siendo numerosas las evidencias encontradas, presentadas y discutidas con la mayor claridad posible. En todos los casos se llamó la atención sobre hecho de que, por más claras y obvias que fuesen tales evidencias, continúa siendo necesario contar con trabajos geomorfológicos detallados, que hasta el momento no se han realizado en el área objeto de estudio.

Aunque para la evolución del relieve el factor climático se ha colocado en segundo lugar, el mismo no puede ser desatendido. En efecto, dicho factor posee su parte de la responsabilidad en la esculturación y evolución del relieve, pues, particularmente en el área objeto de estudio, actúa fuertemente en los procesos de movimiento de ladera y de la corriente de deriva costera que influencia fuertemente la erosión verificada en las playas de Marbella y Boca Grande.

Para estudios integrados del paisaje los datos sobre la geomorfología son indispensables. El análisis del relieve permite sintetizar la historia de las interacciones dinámicas que ocurren entre el sustrato litológico, la tectónica y las variaciones climáticas. Los datos geomorfológicos permiten interpretar un problema indispensable para la planificación ambiental: la relación entre las configuraciones superficiales del terreno y la distribución de los núcleos o aglomeraciones humanas, es decir, la ocupación de suelos en función de las limitaciones impuestas por el relieve.

En virtud de esos conjuntos de características, es muy común que el relieve sea punto de referencia para los estudios de planificación ambiental y determinante de los espacios administrables. Es necesario enfatizar que los datos geomorfológicos son la base para la elaboración de diagnósticos ambientales cuyo resultado es de suma importancia para alternativas de minimización de riesgos ambientales. En resumen, las informaciones sobre el relieve siempre sumadas a los datos geológicos, permiten una evaluación más precisa del terreno, con sus relaciones de fragilidades y potencialidades naturales, así como las consecuencias de la intervención humana. Por lo tanto, es importante llevar a cabo investigaciones geomorfológicas en Colombia que permitan una integración más amplia y consolidada del basamento rocoso con la tectónica.

Referencias

- [1] Carvajal, J.H., Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Bogotá: INGEOMINAS, 2012.
- [2] Toto, E.A. and Kellogg, J.N., Structure of the Sinú–San Jacinto fold belt – An active accretionary prism in norther Colombia. *Journal of South American Earth Science*, 5(2), pp. 211-222, 1992.
- [3] IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Hoja N.23 III D. Bogotá: IGAC, 1 hoja, B/N. 90 cm x 70 cm. Escala 1:25.000. 1996.
- [4] DANE, Departamento Administrativo Nacional Estadística. Resultados y proyecciones (2005–2020) del censo de 2005 [consulta, 1-8 de octubre de 2015]. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20
- [5] INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería. Geología de los cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del valle inferior del Magdalena – Caribe Colombiano, escala: 1:300.000. Bogotá: INGEOMINAS, 2004.
- [6] INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería. Geología de las planchas 23, Cartagena y 29 – 30 Arjona. Bogotá: INGEOMINAS, 2001.
- [7] Angel, C., Esquivel, J. y Sarmiento, G., Geología del Departamento de Bolívar al norte del Canal del Dique. Bogotá: INGEOMINAS, (Informe, 1941), 1985.
- [8] INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería. Geología de la plancha 23 Cartagena. Bogotá: INGEOMINAS, plancha color., 90 cm x 70 cm. Escala: 1.100.000, 2003.
- [9] Hartwing, M.E. y Riccomini, C., Análise morfotectônica da região da Serra dos Orgãos, sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 11(1), pp. 11-20, 2010. DOI: 10.20502/rbg.v11i1.137
- [10] Carvalho, T.M. e Latrubesse, E.M., Aplicação de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: O caso da bacia hidrográfica do Araguaia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 5(1), pp. 85-93, 2004. DOI: 10.20502/rbg.v5i1
- [11] Barbosa, M.E.F. e Furrier, M., Caracterização geomorfológica e morfométrica para averiguação de atividade tectônica. *Revista Mercator*, 14(3), pp. 123-149, 2015. DOI: 10.4215/RM2015.1403.0008
- [12] De Biasi, M., Carta de declividade de vertentes: confecção e utilização. *Geomorfologia*. São Paulo, 21, pp. 8-13, 1970.
- [13] Christofoletti, A., Aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos projetos de planejamento. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B (Org.). *Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos*. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007, pp. 415-437.
- [14] EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006.
- [15] Guerra, A.T. e Guerra, A.J.T., *Novo dicionário geológico-geomorfológico*. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- [16] Fitz, P. R. *Geoprocessamento sem complicação*. São Paulo: Oficina de Textos. 2008.
- [17] Marquez, J.S., *Ciência geomorfológica*. In: Guerra, A.J.T., Cunha, S.B., (Org.). *Geomorfologia: Uma atualização de bases conceitos*. 10. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. pp. 23-50.
- [18] Furrier, M., *Caracterização geomorfológica e do meio físico da folha João Pessoa 1:100.000*. Tese Dr. em Geografia. Programa de Pós-Graduação em Geografia – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH), Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2007, 213 P.
- [19] Penck, W., *Morphological analysis of landforms*. London: Macmillan and Co, 1953.
- [20] Mescerjakov, J.P., Les concept de morphostruture et de morphosculture: un nouveau instrument de l'analyse geomorphologique. *Annales de Geographie*, Paris, 77 années, N. 423, pp. 539-532, 1968.
- [21] Ross, J.L.S., O registro dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Revista do Departamento de Geografia da FFLCH/USP*, São Paulo, 6(1), pp. 17-29, 1992.
- [22] Demek, J., Generalization of geomorphological maps. *Progress maden geomorphological Mapping*. Brno, pp. 36-72, 1967.
- [23] Ross, J.L.S. e Moroz, I.C., *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: FFLCH-USP/IPT/FAPESP, 1997.
- [24] MINEROPAR. Serviço Geológico do Paraná. *Mapa geomorfológico do Estado do Paraná*. Paraná: MINEROPAR, 2006. 1 mapa, color. Escala 1:650.000

M. Furrier, es Geógrafo de la Universidade de São Paulo, MSc. y Dr. en Geografia Física. Es profesor asociado de la Universidade Federal da Paraíba donde suministra clases de Geomorfología y Geología General para las carreras de Geografia e Ingeniería Ambiental. Es profesor es investigador en el Programa de Posgrado en Geografia con investigaciones en Geomorfología Estructural, Ambiental y Urbana. Fue pasante posdoctoral en el Departamento de Geografia de la Universidad Nacional, sede Bogotá. ORCID: 0000-0001-8882-5290

G. Vargas-Cuervo, es Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, DESS en Teledetección y Dr. en Ciencias de la Tierra de la Universidad Pierre et Marie Curie, Paris VI. Profesor de la Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geografia, sede Bogotá. ORCID: 0000-0003-2489-39

C. C. Moncada, es Ing. Geógrafo y Ambiental de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. ORCID: 0000-0002-6082-4875

Characterization of weathering profiles of the crystal rocks of eastern Bucaramanga and definition of hydrogeological properties

Juan Diego Colegial-Gutiérrez, María Camila Forero-Quintero ^a, María Alejandra Fuentes-Rueda ^a & Sully Gómez-Isidro ^b

^a Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. colegial@uis.edu.co, camilaforero.uis@gmail.com, malefu@hotmail.com

^b Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. sgomez@uis.edu.co

Received: December 20th, 2015. Received in revised form: July 10th, 2016. Accepted: December 10th, 2016.

Abstract

In the process of improving the knowledge of the hydrogeological potential of weathered zones in crystalline rocks and compounds that can behave as aquifers, this article is performed whose area of study is located east of the metropolitan area of Bucaramanga, Santander Massif consists of two main lithological units; the Neis of Bucaramanga and Santander Group plutonic (diorite, granodiorite-tonalite gray quartz monzonite and monzogranite). These rocks have undergone brittle deformation, physico-chemical weathering mainly influenced by the tropical atmosphere of the area also are jointed and fractured creating conditions that facilitate the flow of water and in turn be optimized weathering processes in the region. He appealed to the identification and location of field weathering profiles made a detailed study of outcrops, presenting a thickness of 90.4 m for the profile of the Gneissic rock weathering and 68.5 m for the profile of granodiorite rock, made up 6 steps weathering of which samples each were taken and carry out macroscopic analysis, petrographic and geochemical using thin films, determining the percentage of porosity, humidity, dry unit weight, X-ray fluorescence, electron microscopy Sweeping and Grading; base characterizing weathering profiles and properties, highlighting the potential hydrogeological found in the Range II: Slightly weathered rock and interval V: Completely weathered rock profile of granodiorite rock and Rock Gneissic profile, the interval III: Moderately weathered rock and the range V: Completely weathered rock, since these stages of weathering, moisture peaks present, regular micro fractures and high porosities.

Keywords: Weathering, Santander Massif, Hydrogeology, crystalline rocks. Aquifers.

Tipificación de perfiles de meteorización de rocas cristalinas al oriente de Bucaramanga y definición de propiedades hidrogeológicas

Resumen

Las rocas al Este del área metropolitana de Bucaramanga (Santander, Colombia), forman parte del Macizo de Santander el cual está constituido principalmente por rocas metamórficas, intruidas por diversos cuerpos ígneos, el conjunto rocoso ha sufrido deformación frágil y meteorización físico-química influenciada principalmente por el ambiente tropical de la zona, además el estado de fracturamiento ha generado condiciones que facilitan el flujo de agua y optimizar los procesos de meteorización en la región.

Las rocas cristalinas de la zona presentan completa meteorización, se recurrió a la identificación y localización de perfiles de meteorización en campo realizando un estudio detallado de afloramientos, obteniéndose un espesor de 90,4 m para el perfil de meteorización de rocas Gnéisicas y 68,5 m en rocas Granodioríticas, definiéndose 6 segmentos de meteorización de los cuales se tomaron muestras de cada uno de ellos para llevar a cabo análisis macroscópicos, petrográficos y geoquímicos, mediante láminas delgadas, determinación del porcentaje de porosidad, humedad, fluorescencia de rayos X, microscopía electrónica de Barrido y Granulometría. Con base en la caracterización de los perfiles de meteorización y sus propiedades, sobresale el potencial hidrogeológico encontrado en el segmento denominado Intervalo II: Roca ligeramente meteorizada y el intervalo V: Roca completamente Meteorizada en el perfil de roca Granodiorítica y para el perfil de Roca Neísica, el Intervalo III: Roca moderadamente Meteorizada y el intervalo V: Roca Completamente meteorizada, ya que estos estadios de meteorización, presentan picos de humedad, micro fracturas regulares y altas porosidades.

Palabras Clave: Meteorización, Macizo de Santander, Hidrogeología, Rocas cristalinas. Acuíferos.

How to cite: Colegial-Gutiérrez, J.D., Forero-Quintero, M. C., Fuentes-Rueda, M. A. & Gómez-Isidro, S., Tipificación de perfiles de meteorización de rocas cristalinas al oriente de Bucaramanga y definición de propiedades hidrogeológicas. Boletín de Ciencias de la Tierra, (41), 16-30, 2017.

1. Introducción

Al oriente del área metropolitana de Bucaramanga, se encuentran aflorando volúmenes importantes de rocas cristalinas que constituyen el denominado Macizo de Santander.

Históricamente las empresas que suministran agua a los municipios del área metropolitana han obtenido el recurso de estas zonas, considerándolas como una reserva de agua, donde ocurre la recarga a los acuíferos de Bucaramanga [11] y alimenta manantiales y ríos que aportan el agua a las bocatomas de la región; por tal razón se hace necesaria la caracterización de las propiedades petrofísicas de las rocas cristalinas correlacionándolas con el avance de la meteorización, los cuales podrían establecer la capacidad de las rocas cristalinas para permitir el flujo de agua a través de ellas y formar potenciales almacenamientos subterráneos del recurso hídrico.

La meteorización se define como, el conjunto de procesos que cambian las características originales de la roca, la cual se somete a los agentes activos de la intemperie como la presencia de agua, la temperatura y la actividad de los organismos. Esta meteorización genera una nueva roca con otras características mecánicas y químicas. Según González (2002) [13] la meteorización es la desintegración y/o descomposición de los materiales geológicos en superficie, incluyendo dentro de este término todas las alteraciones físicas y químicas que modifican las características y propiedades de los materiales rocosos originales.

En los estudios de rocas cristalinas meteorizadas se han definido diferentes parámetros para la clasificación de la meteorización según el autor que se consulte, por ejemplo: Dewandel et al. (2006) [8], definen los estados de meteorización en cinco capas diferenciadas según la textura, el fracturamiento y propiedades petrofísicas, de este modo, la nomenclatura desde la capa menos meteorizada hasta la de mayor meteorización las denominan de la siguiente manera: Basamento fresco, capa fisurada, capa laminada, saprolito (llamado también alterita o regolito) y laterita o corteza de hierro. Duzgoren, Aydin & Malpas (2002) [10], establecen índices de meteorización encontrados a partir de estudios cuantitativos en la composición química y mineralógica.

De otra parte, autores como Aristizábal, et al. (2011) [3], han estudiado los procesos químicos generales que tienen lugar en la meteorización, ofreciendo la posibilidad de diferenciar los estadios de meteorización alcanzados por las rocas en un momento determinado.

El propósito del presente artículo es presentar la base conceptual de un modelo hidrogeológico de perfiles de meteorización; tanto para el Neis de Bucaramanga y El Complejo Plutónico de Santander, rocas metamórficas e ígneas respectivamente y además mostrar el potencial hidrogeológico en este tipo de rocas [8]. Para ello se realizaron diferentes análisis físicos, petrográficos y geoquímicos, recurriendo a láminas delgadas, determinación del porcentaje de porosidad, humedad, peso unitario seco, fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X, microscopía electrónica de Barrido, permeabilidad y Granulometría.

2. Localización y marco geológico

La zona de estudio se encuentra en las microcuencas del río Hato o Lato y del río de Oro Alto, al oriente del área metropolitana de Bucaramanga (Fig. 1) correspondiente a las planchas 120-II-B-4 y 120-II-D-2 escalas 1:10.000 del sistema cartográfico del Instituto Geográfico Colombiano Agustín Codazzi. La zona se encuentra delimitada por las coordenadas geográficas elipsoidales, latitud: 7°0'1,63592''N - 7°3'16,47567''N, y longitud 73°3'17,44604''W - 73°0'1,54690''W (Fig. 1), con una altura sobre el nivel del mar que va desde los 1139 m hasta 2416 m y un área de 36 Km², comprendiendo 2 pisos térmicos: Piso térmico medio con Altitudes comprendidas entre 1000 y 2000 m sobre el nivel del mar y temperaturas entre 18°C y 24°C. Piso térmico Frío, con Altitudes comprendidas entre 2000 y 3000 msnm y temperaturas entre 12°C y 18°C [14]. Presenta dos periodos de lluvia y dos periodos secos intercalados, durante el año, asociado a la zona de convergencia intertropical. La precipitación promedio anual de la microcuenca Oro Alto es de 1250 mm y una temperatura media de 16.8 °C, mientras que la precipitación promedio de la microcuenca Lato Bajo es de 1400 mm y temperatura media de 23 °C [16].

Geológicamente está ubicada en la Provincia Tectónica del Macizo de Santander, dentro del bloque Floresta, esta Provincia se encuentra influenciada fuertemente por la Falla de Bucaramanga (Fig. 2), compuesta principalmente por rocas metamórficas precámbricas y paleozoicas, y rocas ígneas paleozoicas y mesozoicas. Dentro de las litologías presentes en la zona se encuentra el Neis de Bucaramanga, el grupo plutónico de Santander denominado por Royero et al (2001) [18], compuesto por Diorita, Granodiorita – Tonalita, Cuarzomonzonita Gris y Monzogranito, la Formación Silgara, la Formación Girón y Depósitos cuaternarios como aluviones, terrazas y conos de deyección según Mapa Geológico del cuadrángulo H-12, escala 1:100.000 [21], correspondiente a Bucaramanga.

3. Metodología

El trabajo se fundamenta en el levantamiento de columnas compuestas para lo cual se recorrieron 36 Km², alcanzando un total de 62 estaciones, de las cuales 24 corresponden a roca ígnea, 21 a roca metamórfica, 10 afloramientos de contacto intrusivo entre roca ígnea y metamórfica y 6 afloramientos de suelo residual. El estudio de los perfiles de meteorización realizado en cada una de las estaciones se basó en las metodologías propuestas por los diferentes modelos conceptuales de meteorización por Brown (1981) [6], Dewandel et al (2006) [8] y Borrelli et al (2012, 2013) [4-5], con los cuales se reúnen consideraciones geotécnicas, hidrogeológicas y físico-químicas respectivamente. En la Tabla 1 se presentan todos los criterios y características relevantes de los diferentes intervalos de meteorización los cuales son la base para establecer el modelo conceptual de los perfiles de meteorización.



Figura 1. Mapa de localización del área de estudio, la línea de color verde representa la divisoria de aguas que separa las Microcuencas del río Hato o Lato (al este) y del río de Oro Alto (al oeste).

Fuente: Los autores.

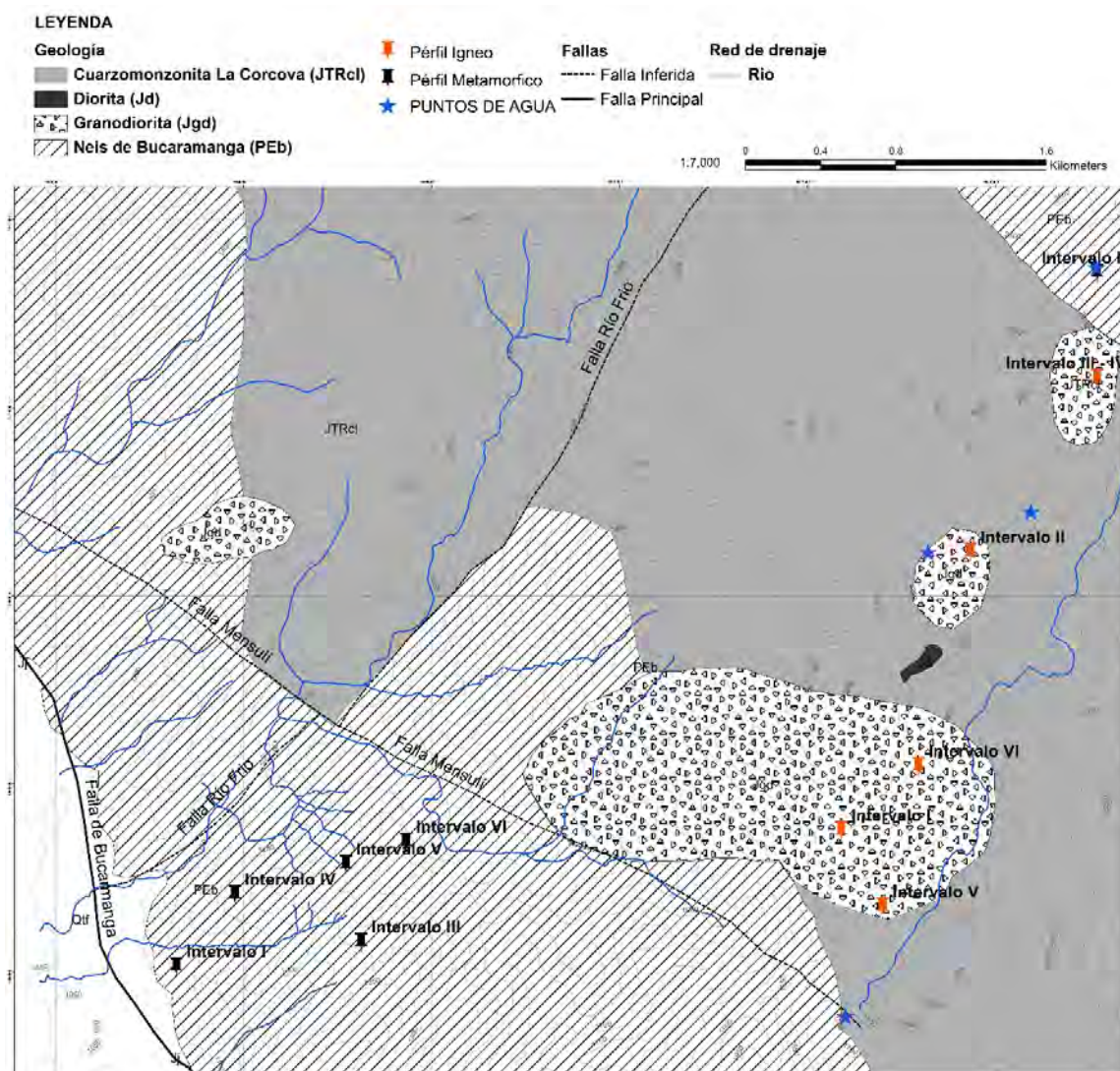


Figura 2. Mapa Geológico del área de estudio: Microcuencas del Río Lato y Río Oro Alto a escala 1:8.000, se observan los afloramientos representativos para el perfil de roca de Néisica de color negro y de color rojo los afloramientos representativos del perfil de roca Granodiorítica. Las estrellas de color azul indican afloramientos de agua en la zona.

Fuente: Los autores.

De los perfiles levantados, los de mayor continuidad y desarrollo corresponden con los de rocas Granodioríticas y Gneis cuarzo feldespático ya que en estas litologías se diferenciaron intervalos de meteorización con base en la decoloración, el porcentaje de oxidación, el porcentaje de minerales arcillosos y el grado de resistencia mecánica que se identificaron en afloramientos representativos, los perfiles de meteorización muestran una secuencia en su evolución según se observa en muestras de mano (Fig. 3) y columnas generalizadas del perfil de roca Gneílica y Granodiorítica (Figs. 4 y 5) en donde se tuvo en cuenta la suma de los espesores de todos los afloramientos que pertenecen a las respectivas litologías. Para caracterizar los perfiles de meteorización se emplearon los análisis fisicoquímicos siguientes:

Análisis Petrográfico mediante secciones delgadas tinturadas. Con el fin de describir y clasificar la composición mineral, las texturas y estructuras existentes y realizar la clasificación litológica de las rocas al igual que caracterizar los estadios de alteración que se presentan en la secuencia estudiada. Las secciones petrográficas se hicieron en un microscopio de luz transmitida Leitz LABORLUZ 12 POL acoplado con oculares de 10x y aumentos de 4x, 10x y 40x.

Determinación del porcentaje de porosidad. Para la realización del ensayo de porosidad, las muestras tuvieron una preparación especial basada en la NORMA API RP 40: Estas prácticas son recomendadas para el análisis de Núcleos, y describen la forma de extracción de Plugs a partir de una muestra y su tratamiento para la preservación de la misma. El procedimiento para rocas consolidadas y no consolidadas, depende de las diferentes propiedades físicas de las rocas. Después de la realización de todos los Plugs tanto para muestras consolidadas como no consolidadas, éstas se llevaron a limpieza en el Soxhlet, luego al horno a 80°C por 12 horas y finalmente al Porosímetro de Helio. Realizado en el laboratorio de Petrofísica de la Universidad Industrial de Santander.

Contenido de agua. Se realiza para conocer el peso del agua removida al secar dicho material cuando esta húmedo hasta un peso constante, en un Horno controlado a $110 \pm 5^\circ\text{C}$. El valor resultante corresponde al peso del agua atrapada naturalmente en los poros de la muestra. El peso del material remanente después de secado en el horno, corresponde al peso de las partículas sólidas (I.N.V. E-122). El equipo utilizado es un horno, una balanza y vasijas resistentes a la temperatura. Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Materiales adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil, ubicado en la Universidad Industrial de Santander.

Fluorescencia de rayos X (FRX). Dentro de la metodología de trabajo empleada en la toma de datos, los análisis cuantitativos se realizaron empleando curvas de calibración mediante el método de QUANT-EXPRESS (Parámetros Fundamentales) en un Espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X de longitud de onda dispersiva de 4KW marca BRUKER modelo S8 TIGER detector de Centelleo para elementos pesados y de Flujo para elementos livianos, la fuente de Rayos-X fue un tubo de Rodio (Rh) y un Goniómetro de alta precisión para ángulos theta y 2 theta.

Esta prueba se llevó a cabo en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander.

Microscopia electrónica de Barrido. Para la realización de esta prueba la muestra de 1 cm (sin pulir) fue sometida al secado en horno a 60°C por 24 horas, antes de ser introducida en la cámara de vacío, en la cual la muestra se cubre con una capa de Carbono; para proceder al microscopio Quanta FEG 650 de marca FEI, que utiliza la tecnología de emisión de campo (Schottky Field Emission Gun) para la generación del haz de electrones y crear una imagen que refleja las características superficiales de sus constituyentes. De esta manera se obtiene información de las formas, texturas y composición química de los constituyentes minerales del material analizado como los minerales de arcilla. Los minerales de arcilla, al constituir la mayor parte de los materiales analizados, se pudieron identificar mediante morfología comparada con las fotografías ya identificadas por diferentes autores como: Duzgoren et al., 2002 [10]; Borrelli et al., 2012 [4]; Borrelli et al., 2013 [5]; y González et al., 2002 [13]. Esta prueba se llevó a cabo en el Laboratorio de Microscopia electrónica de la Universidad Industrial de Santander.

Análisis Granulométrico. Se disgregaron las muestras con un mortero, sin cambiar el tamaño de grano que presenta la roca, posteriormente se llevaron las muestras a limpieza con Tolueno (solvente) en el Soxhlet por método de extracción y limpieza durante 8 horas utilizando un dedal para preservar la muestra. Luego se llevan al horno a una temperatura 80°C durante 12 horas. Se realiza un cuarteo para obtener 100 g representativos de la muestra; estos 100 g de muestra se llevan al tamizaje o zaranda (el cual debe pesarse antes de que se introduzca la muestra) durante 20 min. Finalmente se pesa cada tamiz con la muestra retenida y se toma nota de estos valores. Este análisis se desarrolló en el Laboratorio de Petrofísica adscrito a la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander.

4. Resultados

Después de desarrollar la metodología propuesta se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

4.1. Descripción de propiedades físicas

El criterio de clasificación en escala de afloramiento utilizado para realizar la caracterización física de los 6 intervalos de meteorización es el grado de resistencia mecánica (Brown, 1981) [6] mostrado en la Tabla 2. En la medida que aumenta el grado de meteorización la resistencia física disminuye, puesto que la roca sufre degradación y por tanto transformación de sus propiedades originales, pudiendo alcanzar Intervalos de meteorización superiores y convertirse en suelo residual. Otro criterio utilizado es la decoloración del material rocoso, de acuerdo a la Tabla 3 propuesta por Munsell (1999) [15]. Este criterio evidencia los cambios mineralógicos y químicos a los que se somete la roca al estar expuesta en superficie, este criterio igualmente permite diferenciar cada uno de los intervalos de meteorización.

Tabla 1.

Recopilación de modelos conceptuales según los siguientes autores: Brown (1981) [6], Dewandel et al (2006) [8] y Borrelli et al (2013) [5], reuniendo las características físicas relevantes para los diferentes intervalos de meteorización.

Brown (1981)	DEWANDEL ET AL (2006)	BORRELLI ET AL (2013)	DESCRIPCIÓN AFLORAMIENTO
VI Suelo Residual	Laterita o Corteza De Hierro	VI Suelo Residual y Coluvión	Todo el macizo rocoso se ha transformado en suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material. El macizo rocoso se compone principalmente de suelo residual, coluvial y; b. El material tiene principalmente las siguientes características: completamente decolorados; piezas de gran tamaño pueden ser fácilmente disgregadas con las manos y se desmorona por la presión de los dedos en los granos constituyentes. En algunas ocasiones puede estar ausente, debido a la erosión o re-hidratación de hemetita. Se disgrega con el tacto, deleznable con el martillo y puede desconcharse con una navaja.
V Completamente Meteorizado		V Completamente Meteorizada	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto, completamente descolorido. No conserva la estructura original de la roca o se encuentra en forma de relicto. La masa de roca está completamente meteorizada (saprolito) (más de 70% del afloramiento). En este intervalo se define la <i>Alloterite</i> : la cual es un horizonte arcilloso, donde se presenta una reducción de volumen relacionado con procesos de meteorización mineralógica.
IV Altamente Meteorizado	Saprolito o Alterita, Regolito	IV Altamente Meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo, completamente descolorido. La masa de roca está altamente meteorizada (más de 70% del afloramiento); volúmenes de macizos rocosos limitados por discontinuidades pueden estar constituidos por roca moderadamente o altamente meteorizada. Los volúmenes constituidos por suelos residuales, se presentan rara vez en el afloramiento, las fracciones arena y limos son predominante. En este intervalo se define la <i>Isalterita</i> en la cual los procesos de meteorización sólo inducen un ligero cambio del volumen y conservan la estructura de la roca original.
III Moderadamente Meteorizado	Capa Laminada	III Moderadamente Meteorizada	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados. La masa de roca esta moderadamente meteorizada (más de 70% del afloramiento). Es la base de la <i>Isalterite</i> , presenta laminación horizontal de los minerales más grandes (por ejemplo, pórfidos de feldespatos), pero sigue conservando en gran medida la estructura original de la roca. Los colores penetrantemente son más tenues en comparación con la roca fresca, pero localmente el color de la roca fresca está presente. Para rocas ígneas moderadamente meteorizadas, se observan fracturas concoideas o concéntricas (Core Stones) formando estructuras de "Cascarones".
II Ligeramente Meteorizado	Capa Fisurada	II Ligeramente Meteorizada	La masa de roca está ligeramente meteorizada (más de 70% del afloramiento). Presenta el mismo color de la roca fresca con decoloración sólo cerca de las discontinuidades; textura y microestructura de la roca fresca originales se conservan perfectamente. Se caracteriza por presentar fisuras densas horizontales en los primeros metros y a una mayor profundidad fisuras sub-horizontales y sub-verticales.
I Roca Fresca	Basamento Fresco	I Roca Fresca	Roca sin cambio desde el estado original o solo ligeramente manchado a lo largo de las discontinuidades. La masa de roca es fresca (más de 70% del afloramiento); Puede ser considerado como impermeable y de muy bajo coeficiente de almacenamiento, en una escala local.

Fuente: Los autores

En el caso del perfil de roca metamórfica el intervalo de meteorización I (Tabla 3), presenta una tonalidad Strong Brown 7.5 YR de color café correspondiente a un valor cromático de 5/8 mientras que el intervalo de meteorización VI (Tabla 3), presenta tonalidades Reddish Yellow 7.5 YR de color rosa con un valor cromático de 8/6. En el perfil de rocas ígneas el intervalo de meteorización I (Tabla 3): Roca fresca presenta tonalidad Yellow 2.5 YR de color beige (café claro) y valor cromático de 8/6 mientras que el intervalo de meteorización VI, presenta tonalidad Pink 7.4YR de color rosa claro con un valor cromático de 8/4. La decoloración en cada uno de los perfiles de meteorización, muestra la alteración de minerales, aparición de óxidos y transformación de roca original, dando como resultado un suelo residual correspondiente al intervalo de meteorización VI.

El porcentaje de oxidación y de minerales arcillosos es el último criterio utilizado para hacer la caracterización macroscópica de los perfiles de meteorización. Estos porcentajes corresponden a valores cuantitativos determinados mediante diagramas representativos de porcentajes (Cruz, 2007) [7], que permiten obtener el

promedio del porcentaje de oxidación y de minerales arcillosos para cada intervalo de meteorización. Estos valores se obtienen comparando los diagramas de porcentajes de tamaño de grano, con muestras de mano de todos los afloramientos cartografiados en la zona de estudio. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4, se observa el incremento de estos porcentajes a medida que aumenta el grado de meteorización, en el perfil de roca metamórfica, el mayor porcentaje de oxidación corresponde al intervalo de meteorización II. La tendencia de los porcentajes es ascendente a medida que se incrementa el grado de meteorización, así los datos son el resultado de las transformaciones minerales en las condiciones superficiales.

4.2. Definición de los perfiles de meteorización

Cada uno de los intervalos de meteorización es caracterizado mediante sus propiedades físicas tanto para el perfil del Neis de Bucaramanga como para el perfil de la Granodiorita, como se observa en la Fig. 3.

Tabla 2 .



Medida Cualitativa del Grado de Resistencia Mecánica, utilizado para la caracterización de ambos perfiles de meteorización (Roca Ígnea y Metamórfica).

Medida Cualitativa Grado de Resistencia Mecánica				
Resistencia compresión simple Mpa	a	Grado de meteorización	Grado de resistencia mecánica	Características
1.0 - 5.0		VI	1-2 ROCA MUY DÉBIL	Se disgrega con el tacto, deleznable con el martillo y puede desconcharse con una navaja
5.0 – 25		V	3-4 ROCA DÉBIL	Se disgrega con el golpe del martillo pero no se puede obtener un bloque muestra del afloramiento, ya que se disgrega en fragmentos, puede desconcharse con dificultad con una navaja; se puede hacer marcas profundas golpeando fuertemente la roca con la punta del martillo
25 – 50		IV	5-6 ROCA MEDIA	Se disgrega con el golpe del martillo, puede obtenerse un bloque muestra del afloramiento, no se puede rayar o desconchar con la navaja
50 - 100		III	7-8 ROCA DURA	Se fractura con el golpe del martillo, pero se necesita más de un golpe para sacar la muestra
100 - 250		II	9 ROCA MUY DURA	Difícilmente se fractura con el golpe del martillo, se necesitan muchos golpes para romper la muestra
> 250		I	10 ROCA EXTREMADAMENTE DURA	Solo se pueden romper esquirlas de la muestra con el martillo geológico

Fuente: Brown ,1981. [6]

Tabla 3.

Degradación del color desarrollado en cada uno de los perfiles de meteorización.

Perfil de Roca Metamórfica			Perfil de Roca Ígnea		
Intervalo de Meteorización	Color según Munsell soil Color Charts	Color	Intervalo de Meteorización	Color según Munsell Soil Color Charts	Color
VI	7,5 YR 8/6 REDDISH YELLOW		VI	7,4YR 8/4 PINK	
V	10YR 7/8 YELLOW		V	7,5YR 8/6 REDDISH YELLOW	
IV	10YR 7/6 YELLOW		IV	7,5YR 7/6 REDDISH YELLOW	
III	7,5YR 6/8 REDDISH YELLOW		III	2,5YR 8/2 POLE YELLOW	
II	7,5YR 6/8 REDDISH YELLOW		II	2,5YR 8/4 POLE YELLOW	
I	7,5YR 5/8 STRONG BROWN		I	2,5YR 8/6 YELLOW	

Fuente: Modificado de Munsell ,1994.

Tabla 4.

Recopilación de los porcentajes de oxidación y minerales arcillosos para cada intervalo de meteorización, representados en promedios para ambos tipos de roca.

Roca metamórfica			Roca Ígnea	
Intervalo de Meteorización	% oxidación	% minerales arcillosos	% oxidación	% minerales arcillosos
I	22,5	4,2	11,1	8
II	52,5	15	11,3	10
III	15	10	14	15
IV	28,7	22	46	30
V	41	44	25	36
VI	47,5	66	62	62

Fuente: Los autores.

La Fig. 4 es el resultado de aplicar los criterios anteriores y representa la sumatoria de espesores de todos los afloramientos que pertenecen al perfil de Roca Gneísica, teniendo un espesor total de 90.4 m dentro del cual el intervalo de meteorización V (completamente meteorizado) presenta el mayor espesor (27.9 m). La Fig. 5 representa el perfil generalizado de roca Granodiorítica, tiene un espesor total de 68.5 m y el intervalo V presenta el mayor espesor con 16 m.

4.3. Descripción petrográfica y mineralógica

Análisis Petrográfico y mineralógico mediante secciones delgadas. En la Fig. 6 se observan las fotomicrografías orientadas de secciones de Neis y Granodiorita. El intervalo I corresponde a roca fresca con ausencia de microfrazas. En los intervalos II y III aparecen microfrazas que atraviesan la roca. El intervalo V es caracterizado por la desaparición de la textura original de la roca. En el intervalo VI se observa alteración química de los minerales y aumento del microfracturamiento. Para el perfil Néisico, en el intervalo I (A) se observa Silimanita y granos de Cuarzo con aplastamiento; Intervalo III (C) presencia de Epidota y Sericita, con microfrazas que atraviesan la muestra y de manera intergranular; Intervalo V (E) minerales de alteración como Clorita y el Intervalo VI (G) con presencia de óxidos y aumento de la matriz fina. Para el perfil Granodiorítico, el intervalo V (F) se observa Sericita y en el intervalo VI (H) minerales de alteración como la Epidota. Para ambas litologías la transición de los intervalos I (Figs. 6A y 6B) al intervalo VI (Figs. 6G y 6H) muestran el paso de una roca fresca o sana con valores bajos de porosidad (1.4% para roca Néisica y 0% para roca Granodiorítica) a un suelo residual en donde la porosidad ha aumentado notoriamente con valores de 19.5% para el Neis y 27.2% para la Granodiorita. Las micro fracturas se observan a partir de los

Intervalos III y II, roca Néisica y Granodiorítica (Figs. 6C y 6D) respectivamente.

Según Dewandel et al (2006) [8] la meteorización favorece el desarrollo de un acuífero compuesto (porosidad primaria y porosidad secundaria) en rocas duras y destaca los intervalos ligeramente y moderadamente meteorizados (intervalos II y III) como potenciales para el flujo y el almacenamiento de agua debido a la presencia de micro fracturas y a la roca completamente meteorizada - Saprolito (intervalo V). Ver Fig. 6.

Análisis mineralógico y textural mediante microscopia electrónica de barrido. En el perfil de roca Granodiorítico se aprecian granos de Cuarzo, Albita, Microclina y moscovita en todos los intervalos de meteorización. Desde la roca fresca (intervalo I) hasta la roca completamente meteorizada (intervalo V), se observó un aluminosilicato con Fe de morfología Tubular (Fig. 7A); existe alteración química en roca ligeramente meteorizada (intervalo II) hasta el suelo residual (intervalo VI) principalmente en granos de Plagioclasas (Fig. 7B). La Caolinita está presente en roca altamente, completamente meteorizada y suelo residual (intervalos IV, V y VI) formando una matriz en este último intervalo (Fig. 7C-D).

Se encuentra presencia de minerales de arcilla desde el primer intervalo de meteorización como son la Esmectita y Vermiculita (Fig. 8A), así mismo Caolinita (Fig. 8B), en los Intervalos I, IV y VI. En roca ligeramente meteorizada (intervalo II) existe formación de micro-fracturas paralelas (Fig. 8C), evidenciadas nuevamente en el intervalo IV en granos de Albita. Igualmente, hay microfrazas en los intervalos V y VI en granos de feldespato. La Disolución en plagioclasas es propia del intervalo II, mientras que la alteración química en granos de Feldespato (Fig. 8D) y micro-fracturas (Fig. 8E) se observó en roca completamente meteorizada (intervalo V).



Figura 3. Transición de cada uno de los intervalos de meteorización, mediante propiedades físicas, tanto para el Perfil Granodiorítico como para el perfil Néisico.

Fuente: los autores

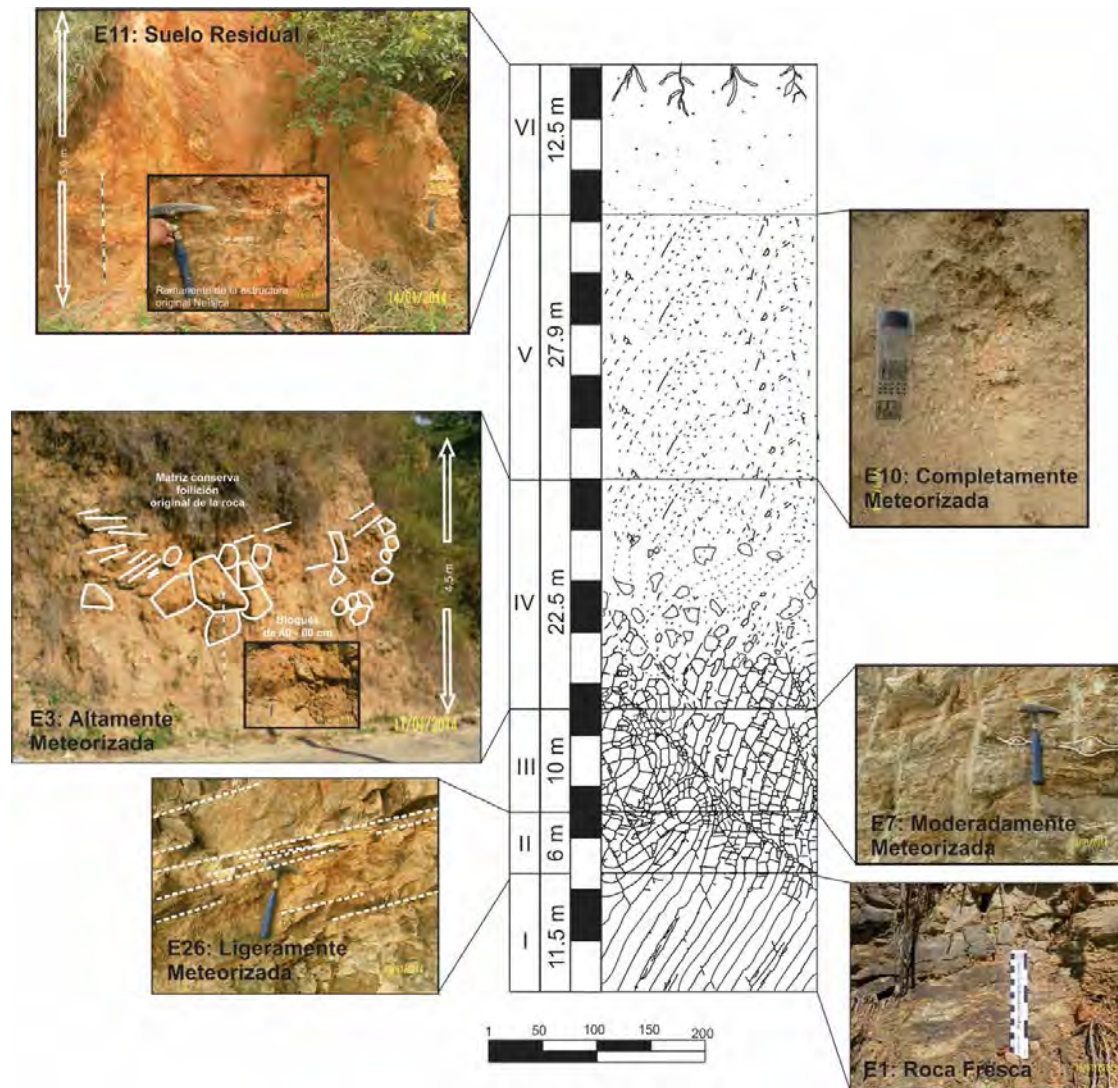


Figura 4. Columna generalizada del perfil de roca Néisica, a escala real (espesores de cada uno de los intervalos de meteorización, tomados en campo), rasgos representativos, Intervalo I: Planos de foliación, bandas composicionales y fracturas en menor proporción, Intervalo II: incremento en la densidad de fracturas, Intervalos III: Bandas composicionales plegadas, Intervalo IV: Presencia de bloques sub-angulares y redondeados, Intervalo V: Granos de cuarzo en una matriz arcillosa e Intervalo VI: Materia orgánica, galerías y restos vegetales.

Fuente: Los autores.

La presencia de óxidos de Fe y Halloysita (Fig. 8F), se evidencia en el Intervalo III; la Illita y neo-formación de minerales arcilla (Fig. 8G-H), solo se identificó en roca altamente meteorizada y suelo residual (intervalos IV y VI).

4.4. Definición de la Meteorización química mediante FRX.

Los resultados encontrados (Tabla 5) muestran que las Perdidas por Ignición (L.O.I) [2,9] van aumentando progresivamente con la intensidad de la meteorización. En el Perfil néisico estos valores en roca fresca (Intervalo de Meteorización I) están entre el 1% y el 2% y va aumentando hasta el Intervalo VI equivalente al Suelo Residual, encontrándose entre valores de 8% y 9%.

En el perfil de Roca Granodiorítica, los valores tienden a aumentar mayoritariamente en los intervalos de meteorización III, IV y VI, equivalentes a la Roca Moderadamente, Altamente Meteorizada y el Suelo Residual respectivamente, pero sin embargo el dato del intervalo VI está por encima del promedio de los datos. Además los Óxidos mayores muestran que en el perfil de roca Granodiorítica el orden de abundancia es $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O}$, conservándose esta relación con el aumento de la meteorización, mientras el contenido de Fe_2O_3 , CaO y Na_2O varía respecto a los intervalos de meteorización, por último el contenido de MgO y TiO_2 es muy bajo durante todo el perfil.

Los Óxidos Mayores del perfil de roca Néisica se comportan de manera diferente, ya que el contenido de SiO_2 varía durante el perfil.

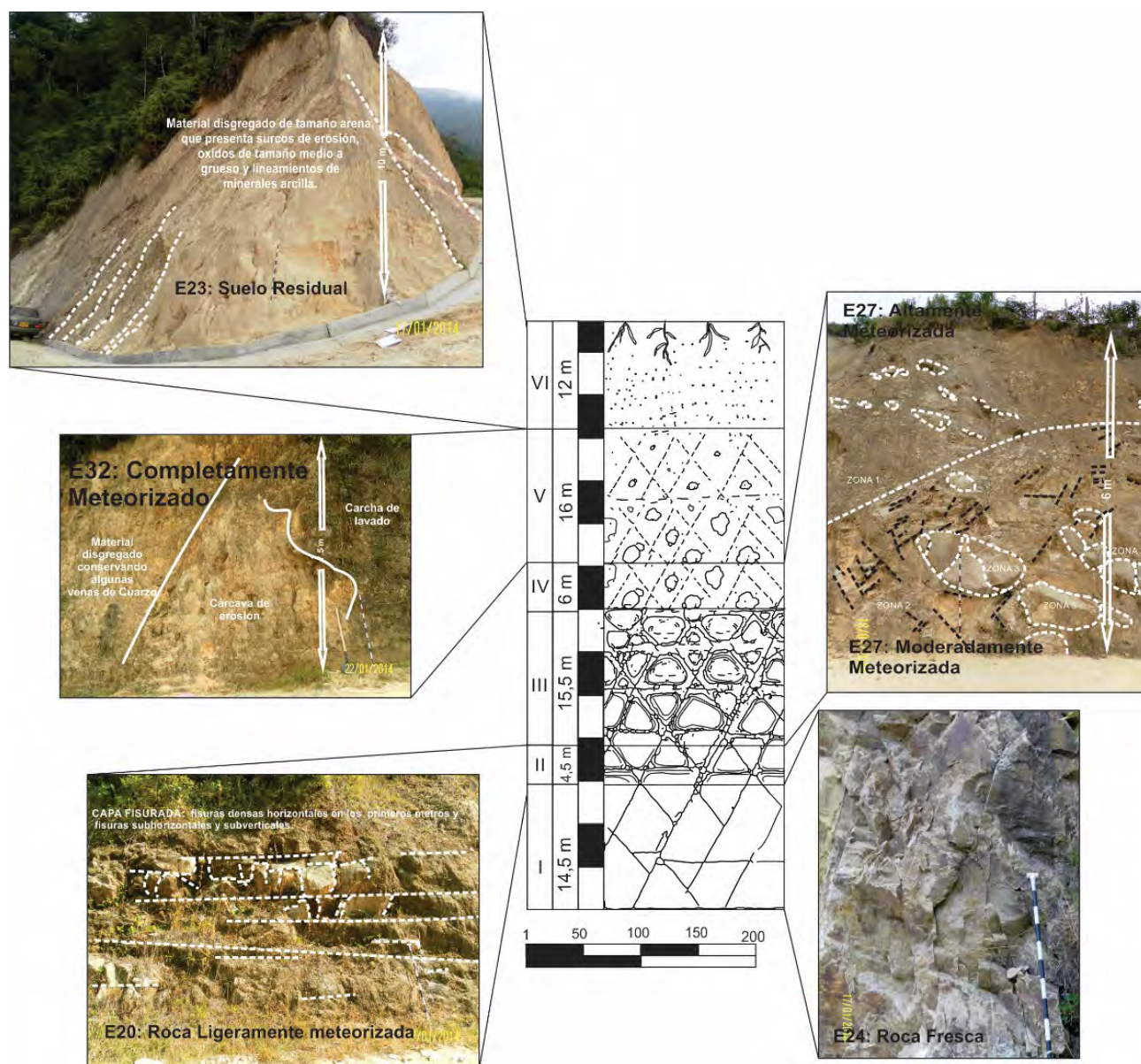


Figura 5. Columna generalizada del perfil de roca Granodiorítica, a escala real (espesores de cada uno de los intervalos de meteorización, tomados en campo), rasgos representativos, Intervalo I: Altamente diaclasado, Intervalo II: Fisuras Sub-horizontales y sub-verticales en mayor densidad, Intervalos III: presencia de fracturas esferoidales (cascarones o nódulos), Intervalo IV: la densidad de bloques y/o cascarones disminuye con respecto al intervalo III de meteorización, Intervalo V: Algunas venas de Cuarzo se conservan pero éstas están altamente fracturadas e Intervalo VI: los minerales se encuentran en una matriz de grano fino.

Fuente: Los autores.

Inicia en el intervalo I con valores cercanos al 80%, descendiendo en el intervalo V a concentraciones menores al 60%, pero luego en el Intervalo VI aumenta su concentración a valores por encima del 60%. El contenido de Al_2O_3 va aumentando a medida que crece el grado de meteorización, presenta valores de 11% en el intervalo I y el valor más alto en el intervalo VI con un dato aproximado de 25%. El contenido de K_2O va disminuyendo a medida que avanza el perfil de Meteorización pasando de 3.59% en el intervalo I a 4.57% en el intervalo III y disminuyendo a 2.93% en el

intervalo VI. La concentración de CaO aumenta durante el perfil de roca néisica presentando una pequeña disminución en el intervalo V, y en el intervalo VI hay pérdida total, con 0% en peso, mientras que el Na_2O disminuye durante todo el perfil de meteorización y en el intervalo IV ya se ha perdido todo el contenido.

Índices de Meteorización y Alteración. A partir del porcentaje en peso (%W) de óxidos mayores se calcularon los índices de alteración y meteorización.

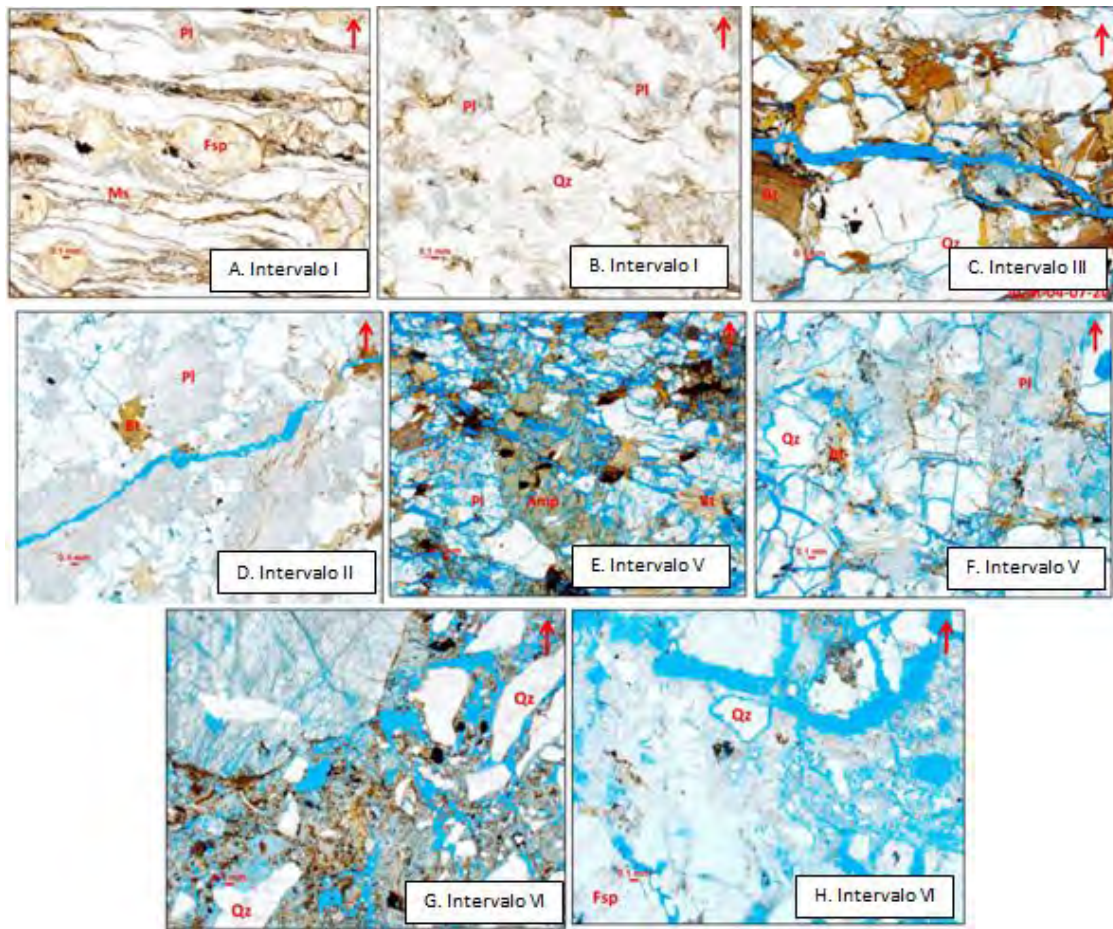


Figura 6. Fotomicrografías orientadas (el Norte es indicado por la flecha roja) (A, Neis) y (B, Granodiorita) roca fresca con ausencia de microfracturamiento, (C, Neis) y (D, Granodiorita) microfracturamiento que atraviesa la roca, (E, Neis) y (F, Granodiorita) la textura de la roca original ha desaparecido, (G, Neis) y (H, Granodiorita) alteración química de minerales y aumento del microfracturamiento.

Fuente: Los autores

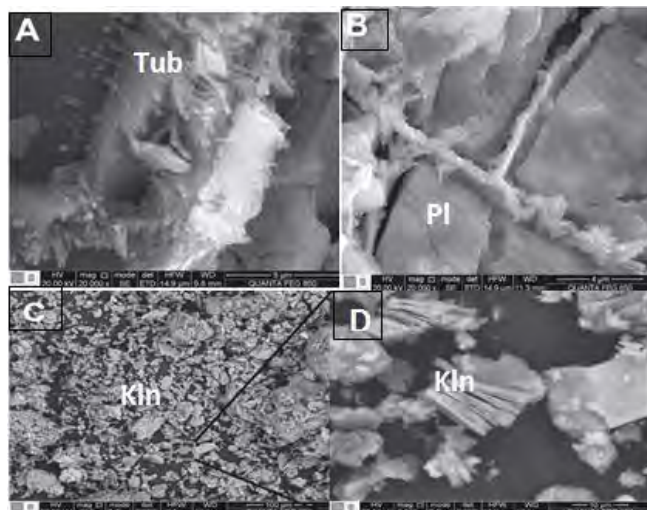


Figura 7. Microfotografías tomadas de SEM del perfil de roca Granodiorítica. A) Mineral de morfología Tubular, B) alteración química en granos de Plagioclasa, C) matriz de caolinita en intervalo de meteorización VI y D) Caolinita.

Fuente: Los autores.

La Relación de Ruxton (Price & Velbel, 2002) [17], relaciona la pérdida de sílice con la pérdida total de los elementos y considera la alúmina como inmóvil durante la meteorización ($R = SiO_2 / Al_2O_3$). La Relación de Ruxton durante la evolución de los perfiles de meteorización se presenta de manera decreciente, mostrando que la concentración de Sílice disminuye con el aumento de la meteorización. Para el perfil de meteorización Granodiorítico, la relación de Ruxton es menos variable encontrándose valores entre 4 – 5 para los intervalos I y II; valores entre 3 – 4 para los intervalos III, IV, V y VI. El perfil de meteorización Néisico se desarrolla en un rango mayor, obteniendo valores oscilantes entre 7 – 8 para el intervalo I y 2 – 3 para el intervalo VI, mostrando que el Neis tiene mayor pérdida de sílice en comparación con el perfil de Meteorización desarrollado por la Granodiorita.

El Índice de Alteración Química CIA (Nesbitt y Young, 1984, 1989. Se define como: $CIA = Al_2O_3 \times 100 / Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O$.

Las variaciones en el CIA reflejan cambios en la proporción de feldspatos y de varios minerales de arcilla desarrollados en los perfiles (Aristizábal et al., 2009) [2]. Las Rocas y minerales frescos sin importar su composición tienen valores de CIA que oscilan entre 40% – 50%, mientras que las muestras que se encuentran completamente meteorizadas tienen valores cercanos a 100% (Aristizábal et al., 2009) [2].

En el Perfil de roca Granodiorítica se observa que CIA tiene valores de 50% – 60% en el intervalo I, concordando con un estado en el que no hay cambios en los elementos químicos, mientras que para el intervalo VI, el CIA alcanza valores de 70%, evidenciando el avance moderado de la alteración química de los minerales constituyentes. Para el Perfil de roca Néisica se evidencia mejor la alteración química, en el intervalo I los valores oscilan entre 60% - 70% y en el Intervalo VI los valores son muy cercanos a 90%. Teniendo en cuenta las condiciones climáticas es decir temperatura y precipitación en donde se desarrolle el perfil de meteorización, se establece la intensidad de la alteración físico-química. De acuerdo a los datos climáticos de la zona de estudio, se encuentra alteración química intensa para el perfil de roca Néisica y alteración química moderada para el perfil de roca Granodiorítica; clasificación que concuerdan con los valores encontrados en CIA.

4.5. Análisis de propiedades Hidrogeológicas

Aunque las rocas ígneas y metamórficas se consideran impermeables en estado sano, en la medida que sufren cambios por fracturamiento o degradación de la roca, esta condición puede cambiar y constituirse en zonas de mayores permeabilidades y formar acuíferos (Dewandel et al. 2006, Gómez 2014) [8,12]. Las propiedades hidrogeológicas empleadas para definir y cualificar la potencialidad de los perfiles de meteorización analizados como acuíferos compuestos son el contenido de agua, la granulometría, la porosidad y la permeabilidad.

Contenido de agua. En el perfil de roca Néisica se observa que los valores más altos corresponden a los intervalos III, V y VI, siendo el intervalo de meteorización V, el que presentan mayor contenido de agua con un 8.07 %. A este intervalo se le atribuye hasta un 40% de minerales arcilla (porcentaje determinado mediante análisis de muestras de mano) teniendo así una capacidad de retención alta pero baja permeabilidad. El perfil de roca Granodiorítica muestra que los porcentajes más altos de contenido de agua pertenecen a los intervalos de meteorización II, V y VI, siendo el intervalo de meteorización V y el que presenta el mayor valor (8.42 %).

Granulometría. A partir del intervalo IV (Roca altamente meteorizada) la roca empieza a comportarse como roca no consolidada. La granulometría presenta una relación importante con las propiedades hidrogeológicas, como la Permeabilidad y la Porosidad.

Para el perfil de Meteorización de roca Granodiorítica el intervalo IV, presenta predominancia de granos con tamaño aproximado de 0.5 mm - 2 mm, aumentando hasta el Intervalo V el cual alcanza a contener cerca del 50% del tamaño de los granos correspondiente a arenas gruesas y muy gruesas (Cruz y Caballero, 2007) [7], pero luego en el intervalo VI que

corresponde al Suelo Residual esta predominancia disminuye a 35% de los granos. El contenido de finos durante el desarrollo del perfil de meteorización de roca Granodiorítica no supera el 25%, siendo el intervalo VI el que presenta el mayor contenido con un 24.35% de granos tamaño limo y arcilla. Para el perfil de meteorización de Roca Néisica se observa que los tamaños de grano limo-arcilla aumentan a medida que el grado de meteorización aumenta, llegando a valores cercanos al 30%. El tamaño de grano predominante para todo el perfil es Arena Gruesa y muy gruesa (0.5 mm -2.0 mm). Para estos tres intervalos el que presenta mayor porcentaje de tamaño de grano arena gruesa- muy gruesa es el intervalo IV, con un valor cercano al 45%, que va disminuyendo hasta un 33% en el intervalo VI.

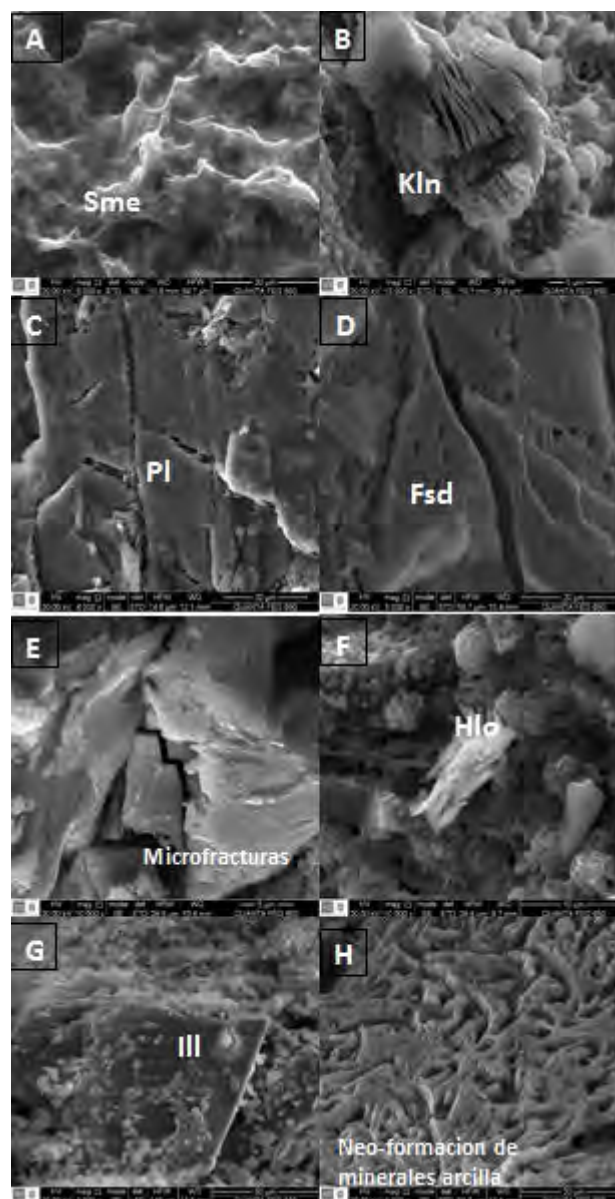


Figura 8. Microfotografías tomadas de SEM del perfil de roca Néisica. A) Esmectita, B) Caolinita, C) Micro-fracturas paralelas en granos de Plagioclasa, D) alteración química en granos de Feldespato, E) micro-fracturas, F) halloysita, G) Illita y H) neo-formación de minerales arcilla (Borrelli et al., 2013).

Fuente: Los autores.

Tabla 5.

Resultado de laboratorio para ambos perfiles de meteorización. Valores en % en Peso (%W). Laboratorio de Rayos X-UIS

Óxidos mayores en el perfil granodiorítico												
INTERVALO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	L.O.I	R	CIA
I	69.69	15.67	7.01	1.57	1.01	3.20	0.18	0.04	0.22	1.20	4.45	58.27
II	67.52	16.70	5.43	2.29	0.40	4.98	0.44	0.13	0.47	1.30	4.04	60.71
III	66.41	17.85	5.34	3.10	1.10	1.35	0.66	0.02	0.46	3.40	3.72	69.62
IV	65.50	18.33	5.71	3.36	1.24	0.73	0.46	0.03	0.47	3.80	3.57	70.47
V	68.64	16.88	6.50	2.10	0.72	1.97	0.38	0.02	0.29	2.20	4.07	64.75
VI	66.63	18.86	6.35	2.19	0.81	0.66	0.34	0.01	0.28	3.60	3.53	70.69
Óxidos mayores en el perfil néisico												
INTERVALO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	L.O.I	R	CIA
I	77.59	10.87	3.52	2.69	0.64	1.83	0.55	0.04	0.39	1.60	7.14	64
II	73.78	11.48	2.23	4.37	2.20	2.15	0.95	0.15	0.52	1.80	6.43	64
III	66.85	15.74	4.50	3.70	2.41	3.51	1.23	0.06	0.52	1.20	4.25	60
IV	63.55	14.29	3.20	14.29	1.94	2.14	2.22	0.04	1.41	2.30	4.45	66
V	53.83	17.01	1.08	2.10	4.57	2.11	2.36	0.15	1.08	6.20	3.16	69
VI	56.99	23.48	2.67	6.43	87ppm	0.04	0.89	0.02	0.74	8.50	2.43	90

Fuente: Los autores.

Porosidad. Los valores calculados a partir del método del porosímetro de Helio para cada intervalo de meteorización muestran que la porosidad va aumentando con el aumento de la meteorización. Para ilustrar esto se utilizó la clasificación de las porosidades totales propuesta por Ardila y Arenas (2010) [1] para rocas sedimentarias, debido a que en los últimos intervalos de meteorización la roca se comporta como roca no consolidada. Ver Tabla 6. Para el perfil de roca Néisica las porosidades van desde Mala para el intervalo I y II; Regular para el intervalo III y Altas para los intervalos V y VI. En González (2002) [13], se definen valores de porosidad de 0.5-1.5% a Granitos y Neis, y en Sanders (1998) [20] para estas mismas litologías con fracturamiento se le otorgan valores de 0.0005 – 0.01 %; afirmando que los procesos de meteorización sufridos por las rocas en este caso, incrementan los porcentajes de porosidad a medida que aumenta la intensidad de la meteorización.

Permeabilidad. En rocas cristalinas la permeabilidad está determinada por el tamaño de las fracturas, diaclasas, aberturas a lo largo de los planos de estratificación y tamaño de las cavidades producto de la disolución, relacionada con porosidad secundaria. En rocas no consolidadas la permeabilidad primaria está relacionada con el tamaño de los granos y la selección de los mismos; altas permeabilidades están asociadas a rocas compuestas por granos redondeados y gruesos que se encuentran bien seleccionados (Sánchez, 2009) [19]. Según la clasificación encontrada en Arenas y Ardila (2010) [1], quienes definen a las rocas con muy mala, mala, aceptable y alta permeabilidad se obtiene la tabla 7, en donde se le atribuye a cada intervalo de meteorización la clasificación correspondiente. El intervalo V en ambas litologías presenta los mayores valores de permeabilidad, en el perfil de roca Néisica la permeabilidad es aceptable y en el perfil de roca Granodiorítica es alta.

Mediante la recopilación de las propiedades físico-químicas y la caracterización de los perfiles de meteorización localizados en el macizo de Santander, se identificaron las cualidades de un acuífero compuesto (permeabilidad primaria y secundaria) propuesto por Dewandel et al (2006)

[8], conformado por 6 intervalos de meteorización descritos anteriormente y de los cuales se destaca el intervalo de meteorización II (ligeramente meteorizado) en donde se observaron fracturas sub-horizontales y sub-verticales a escala de afloramiento, siendo potencial de flujo de agua y el intervalo V (completamente meteorizado), sin presencia de diaclasas ni fracturas pero si con valores de porosidad y permeabilidad alto, teniendo potencial de almacenamiento de agua para el perfil de roca Granodiorítica. De igual manera se destacan el intervalo de meteorización III (moderadamente meteorizado) en el cual se apreció a escala de afloramiento fuerte diaclasamiento y apertura de los planos de foliación y a nivel microscópico micro-fracturas y micro-estructuras con potencial de flujo de agua y el intervalo V (completamente meteorizado), con bloques ≥ 10 cm a escala de afloramiento, alta porosidad y permeabilidad aceptable como potencial de almacenamiento de agua en el perfil de roca Néisica.

Tabla 6.

Valores de porosidad por el método del Porosímetro de helio. Clasificación según Ardila y Arenas (2010).

Perfil Néisico		
Intervalo de meteorizacion	$\varphi = 1 - (V_g/V_{total})$	Clasificacion
VI	40,44	Alta
V	36,22	
IV	-	
III	12,49	Regular
II	3,02	Mala
I	3,34	
Perfil Granodiorítico		
Intervalo de meteorizacion	$\varphi = 1 - (V_g/V_{total})$	Clasificacion
VI	32,7	Alta
V	32,86	
IV	28,48	
III	12,67	Regular
II	11,63	
I	4,67	Mala

Fuente: Los autores

Tabla 7.

Valores de permeabilidad para perfiles de meteorización en roca Neísica y Granodiorítica.

PERFIL NÉISICO		
Intervalo	Permeabilidad (mD)	Arenas y Ardila (2010)
I	0.13	Muy mala
II	0.12	Muy mala
III	1.92	Mala
IV	-	-
V	221.60	Aceptable
VI	120.33	Aceptable
Perfil Granodiorítico		
Intervalo	Permeabilidad (mD)	Arenas y Ardila (2010)
I	0.13	Muy mala
II	10.63	Mala
III	0.12	Muy mala
IV	47.48	Mala
V	983.24	Alta
VI	254.81	Alta

Fuente: Los autores.

5. Conclusiones

Se describen las cualidades hidrogeológicas de los perfiles de meteorización que desarrollan las rocas cristalinas en el macizo de Santander relacionando propiedades físico-químicas y modelos conceptuales preexistentes.

De acuerdo a la intensidad de la meteorización se definieron y caracterizaron los siguientes intervalos: Intervalo I – Roca Fresca, Intervalo II – Roca ligeramente meteorizada, Intervalo III - Roca moderadamente meteorizada, Intervalo IV – Roca altamente meteorizada, Intervalo V - Roca completamente meteorizada e Intervalo VI – suelo residual.

En la medida que aumenta el intervalo de meteorización, independientemente de la litología, los perfiles presentan un aumento en el porcentaje de minerales oxidados y arcillosos, y una disminución tanto de la coloración del material rocoso como de su resistencia física mecánica a la compresión simple.

El Neis de Bucaramanga, en la sección analizada, desarrolla un espesor de meteorización de 90.4m con mayor alteración química que la roca Granodiorítica que presenta un espesor de meteorización de 68.5m. Este fenómeno se evidencia igualmente en los valores encontrados en el índice de alteración CIA los cuales están cercanos a 100, la mayor variabilidad de los datos de las pérdidas por Ignición y la relación de Ruxton para el Neis de Bucaramanga. Esto se explica por las condiciones climáticas a las que cada roca se encuentra expuesta.

Los perfiles de meteorización desarrollan minerales de arcilla, como Caolinita, Halloysita, Vermiculita, Illita y otros de morfología tubular, la caolinita como principal mineral de alteración está presente en cada uno de los perfiles con mayor presencia puesto que esto ocurre en los estados más avanzados de meteorización. Con respecto al contenido de

agua y granulometría ambos perfiles de meteorización desarrollan suelos granulares (Arenas y Gravas).

Resultados de porosidad (en secciones delgadas y porosímetro de helio) y permeabilidad, muestran que estos valores aumentan con el grado de meteorización de las rocas. Los mayores valores se presentan en la roca Neísica en los intervalos II y V y en la roca granodiorítica en los intervalos III y V, relacionados con la presencia de microfracturas y altos valores de humedad.

Las rocas cristalinas en el macizo de Santander presentan espesas franjas meteorizadas que posibilitan el desarrollo de distintos niveles de meteorización, lo cual a su vez facilita la formación de acuíferos. Los intervalos de meteorización anteriores presentan condiciones óptimas de almacenamiento y de flujo.

Los perfiles de meteorización pueden formar niveles de acuíferos con diferentes propiedades hidrogeológicas, se destacan para el perfil de meteorización de Roca Neísica el intervalo III (Roca Moderadamente meteorizada) con potencial de flujo de agua por las fracturas inducidas por la meteorización y el intervalo V (Roca Completamente meteorizada) con potencial de almacenamiento; mientras que para el perfil de meteorización desarrollado en la Roca Granodiorítica se destaca el intervalo II (roca ligeramente meteorizada) con potencial de flujo y el intervalo V (Roca Completamente meteorizada) con potencial de almacenamiento.

La zona cuenta con un inventario de cuatro afloramientos o manantiales. El intervalo II (roca ligeramente meteorizada) del perfil de Roca Granodiorítica con potencial de flujo es aledaño a un punto de agua, resaltándose así su potencial hidrogeológico.

Perfil de meteorización: Roca Neísica							
Intervalo de meteorización	Granulometría	Contenido de agua	Porosidad	Permeabilidad	Micro-fracturas	Micro-estructuras	Características encontradas en campo
I	N/A	Mala	Mala	Muy mala	No	Si	Fracturas cerradas
II	N/A	Mala	Mala	Muy mala	No	No	Fracturas y apertura de los planos de foliación
III	N/A	Regular	Regular	Mala	Si	Si	Fuerte diaclasamiento y apertura de los planos de foliación
IV	Arena gruesa y muy gruesa (44,44%)	Mala	-	-	Si	No	Bloques sub-angulares y redondeados entre 40-60 cm, en matriz arcillosa y fracturas rellenas de material arenoso.
V	Arena gruesa y muy gruesa (33,83%)	Buena	Alta	Aceptable	Si	Si	Bloques ≥ 10 cm, fracturas con carchas de oxidación
VI	Arena gruesa y muy gruesa (32,67%)	Regular	Alta	Aceptable	Si	No	No hay diaclasas, ni fracturas
Perfil de meteorización: Roca Granodiorítica							
I	N/A	Mala	Mala	Muy mala	No	No	Fracturas
II	N/A	Regular	Mala	Mala	Si	No	Fracturas sub-horizontales y sub-verticales
III	N/A	Mala	Regular	Muy mala	Si	No	Fracturas esféricas y fracturas abiertas
IV	Arena gruesa y muy gruesa (44,31%)	Mala	Alta	Mala	Si	No	Fuerte diaclasamiento y bloques de 5 - 10 cm y menores de 5 cm
V	Arena gruesa y muy gruesa (50,45%)	Buena	Alta	Alta	Si	No	No hay diaclasas, ni fracturas
VI	Arena gruesa y muy gruesa (34,93%)	Regular	Alta	Alta	Si	No	No hay diaclasas, ni fracturas

Tabla 8. Cuadro de propiedades Hidrogeológicas para el perfil de meteorización de roca Neísica y roca Granodiorítica.
Fuente: Los autores

Referencias

- [1] Ardila, M. y Arenas, F., Metodología para el análisis e interpretación de resultados de laboratorio de análisis petrofísicos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2010.
- [2] Aristizábal, E., Barry, R. y Shuichiro, Y., Patrones e Índices de Meteorización Química de los depósitos de vertiente y rocas fuente en el Valle de Aburrá, Boletín de Ciencias de la Tierra, 25, pp. 27-47, 2009.
- [3] Aristizábal, E., Valencia, Y., Guerra, A., Vélez, M. y Echeverri, O., Caracterización geotécnica de perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ígneas en ambientes tropicales. Boletín de Ciencias de la Tierra, 30, pp. 47-60, 2011.
- [4] Borrelli, L., Perri, F., Critelli, S. and Gulla, G., Minero – petrographical features of weathering profiles in Calabria, southern Italy. Catena, 92, pp. 196-207, 2012.
- [5] Borrelli, L., Perri, F., Critelli, S. and Gulla, G., Characterization of granitoid and gneissic weathering profiles of the Mucone River basin (Calabria, southern Italy). Catena, 113, pp. 325-340, 2013.
- [6] Brown, E., Rock characterization testing & monitoring: ISRM suggested methods. Oxford: pergamon for the commission on testing methods, International society for Rock Mechanics, 1981, 211 P.
- [7] Cruz, L. y Caballero, V., Guía de laboratorio de sedimentología para geólogos. Laboratorio N°1: Guía para la descripción de la textura de rocas terrígenas. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Publicaciones UIS. 5, 2007, 139 P.
- [8] Dewandel, B., Lachassagne, P., Maréchal, J.C., Wyns, R. and Krishnamurthy, N., SA generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifer controlled by single or multiphase weathering. Journal of hydrology, 330, pp. 260-284, 2006.
- [9] Domínguez, J.M., Román, A.D., Prieto, F., Acevedo, O. y Serrano, S., Índices de alteración y meteorización de los suelos de la Región de Denganthza, municipio de Tepatepec de Francisco I. Madero, Hidalgo. Ingeniería Agrícola y Biosistemas, 3, pp. 57-65, 2011.
- [10] Duzgoren, N., Aydin, A. and Malpas, J., Distribution of clay minerals along a weathered pyroclastic profile, Hong Kong. Catena, 50, pp. 17-41, 2002.
- [11] Gómez, S. y Anaya, A., Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga (Colombia), Revista Avances en Recursos Hídricos, pp. 37-50, 2004.
- [12] Gómez, S., Aguas subterráneas en zonas de alta montaña y trazadores ambientales, 1a ed., Bucaramanga, Eds. UIS, 2014, 161 P.
- [13] González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C., Ingeniería Geológica y Geotécnica, 1a ed., Madrid, Pearson education, 2002, 744 P.
- [14] Grupo de Investigación sobre desarrollo Regional y Ordenamiento Territorial –GIDROT. Santander 2030, Diagnostico Dimensión Biofísico Ambiental territorial de Santander. Bucaramanga Universidad Industrial de Santander. 2011.
- [15] Munsell., Soils colors charts. The Munsell notation for color. U.S. Department Agriculture Handbook 18-Soil Survey Manual, 1994.
- [16] López, D. y Ojeda, A., Determinación del caudal promedio de la microcuenca del río Lato o Hato partiendo de su balance hídrico, Tesis pregrado en Ingeniería Civil), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2006, 117 P.
- [17] Price, J.R. and Velbel, M.A., Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. Chemical Geology, 202, pp. 397-416, 2002.
- [18] Royero, J. y Clavijo, J., Mapa geológico generalizado del Departamento de Santander 1:400.000, Memoria Explicativa, Bucaramanga, Instituto de investigación e información Geocientífica, minero-ambiental y nuclear (INGEOMINAS), pp. 15-22, 2001.
- [19] Sánchez, M.R., Hidrogeología de Acuíferos Fracturados: Conceptos Básicos. Michigan Tech University. 2009.
- [20] Sanders, L., A manual of field hydrogeology, 1a ed., Prentice Hall. 1998. 381 P.
- [21] Ward, D., Goldsmith, R., Restrepo, H. y Gómez, E., Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga, Instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear (INGEOMINAS), 1977.

J.D. Colegial-Gutiérrez, Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Dr. en Ciencias Geológicas de la Escuela de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid, España. Profesor titular de la Universidad Industrial de Santander. Integrante del grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental – GPH de la Universidad Industrial de Santander Bucaramanga, Colombia.
ORCID: 0000-0002-2320-2006

M.C. Forero-Quintero, Geóloga de la Universidad Industrial de Santander. Integrante del grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental – GPH de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
ORCID: 0000-0002-5096-4057

M.A. Fuentes-Rueda, Geóloga de la Universidad Industrial de Santander. Integrante del grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental – GPH de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
ORCID: 0000-0001-8636-1912

S. Gómez-Isidro, Ing. Civil de la Universidad Industrial de Santander, MSc. en Recursos Hídricos y Dra. en Ingeniería, Universidad Nacional de – Colombia, Medellín, Colombia. Profesora titular de la Universidad Industrial de Santander. Directora del grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental - GPH en la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
ORCID: 0000-0002-9200-6586.

Mathematization of geology

Ludger O. Suarez-Burgoa ^a

^a Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. losuarezb@unal.edu.co

Received: January 26th, 2016. Received in revised form: October 1st, 2016. Accepted: November 25th, 2016

Abstract

This article has the objective to consider about the importance of the mathematization of the geology in the Colombian universities. Even though the analysis and the data were taken for the particular case of the Universidad Nacional de Colombia in Medellín, because of the similitude that the careers of Geology and Engineering Geology have in common, it can be considered possible to extrapolate and generalize the conclusions valid for any university in the territory of Colombia. This article analyses the actual standing, its limitations, and show different obstacles limited the development of this as a strong branch of geology; and projects a better situation for the immediate future. The article begins with an historic review that will help to understand how this branch has been coexisted just from the beginning of the formalization of geology as a science in Europe and North America.

Keywords: Geology; mathematics; Colombian universities.

Matematización de la geología

Resumen

El presente artículo tiene el objetivo de reflexionar sobre la importancia de la matematización de la geología en las universidades colombianas. Si bien el análisis y la toma de datos se hacen para el caso de la Universidad Nacional de Colombia en la sede Medellín, por la semejanza que tienen las carreras de Geología e Ingeniería Geológica en el país es posible extrapolar los resultados y generalizar las conclusiones para toda universidad en el territorio nacional colombiano. El artículo analiza la situación actual, sus limitaciones y las trabas que han limitado el desarrollo de la misma como una fuerte bifurcación de la geología tradicional; y proyecta una mejor posibilidad de desarrollo de ésta hacia el futuro inmediato. El artículo inicia con una reseña histórica que ayuda a entender cómo esta rama ha coexistido casi desde la formalización de la geología como una ciencia en Europa y Norteamérica.

Palabras clave: geología; matemáticas; universidades colombianas.

1. Introducción

La geología fue dentro de las demás ramas de las Ciencias de la Tierra la que primero se desarrolló en la historia; pese a que su naturaleza fue en su gran trayectoria especialmente una ciencia descriptiva. La geología tuvo a lo largo de su desarrollo histórico un alto manejo de datos de inventario; y solo a finales del siglo XIX fue cuando muchos de esos datos fueron expresados en forma alfa-numérica o numérica.

Sin embargo, el hecho de no haber manejado números en el nacimiento de la geología no necesariamente indicó que no se estaba haciendo ciencias ni matemáticas; debido a que el uso extensivo de los números en las ciencias data de recién poco más de un par de centenas de años (por ejemplo, la geometría Euclidiana se desarrolló en sus inicios sin el uso

de números). Hoy en día, la geología ha madurado como ciencia y ahora entró a una etapa hacia su completa matematización.

A finales del siglo pasado (siglo XX) se consolidó el término de Ciencias de la Tierra, abarcando no solo la geología como tal sino las demás ramas. De esta manera, en la actualidad la geología es parte de las Ciencias de la Tierra (C), esta última que se conoce como el conjunto interrelacionado de la geología (G), oceanografía (O), meteorología (M), y astronomía (A); que en lenguaje matemático es $C = \{G, M, O, A\}$.

Por lo general, las soluciones concretas de la geología (e.g. el problema de los tres puntos) son abordadas siguiendo alguna metodología: un proceso de descripción y reconocimiento del problema; identificación de los objetos

matemáticos variables; una caracterización de esos objetos desde el punto de vista de la variabilidad de la variable; el planteamiento de la solución con bases matemáticas (*i.e.* matematización de la solución); la búsqueda y encuentro de la solución (si existe, si es posible resolverla o si crea una conjetura); la demostración de la solución; y finalmente su implementación. Sin embargo, normalmente, la solución muchas veces no es única en la geología debido a que en la mayoría de las veces se trata de un problema inverso.

Lamentablemente, la actual explotación de la geología en latino América, en muchos de los casos se queda sólo en el primer paso de esta metodología.

La geología matemática no solo enlaza los conocimientos de la geología con las matemáticas, sino también la estadística; porque en todo proceso se trata a las variables no como variables deterministas, sino como variables aleatorias. Y además, debido a que los problemas a resolver no son casos especiales, toda solución de geología matemática necesita de métodos numéricos; y por tanto se necesita tener conocimientos de programación computacional. De ahí que surgen otras dos ramas, que son: la geología estadística y la geología informática; sin embargo, estos dos conceptos no están formalizados como tales, y resulta más bien que la geología matemática ampara a éstos.

Por tanto, la geología matemática es la disciplina científica que concretiza los conocimientos de las matemáticas en problemas de la geología con el uso de la estadística y la aplicación de las ciencias computacionales.

Vistelius define a la geología matemática como una ciencia sobre modelos matemáticos de procesos geológicos [18]. El identificó que las observaciones geológicas implican variables y procesos aleatorios, y manifestaba luego que la geología matemática en principio es una rama de la ciencia sobre modelos estocásticos de procesos geológicos. Bajo esta definición, la geología matemática tiene un alto carácter estadístico.

El término geología matemática tiene otros nombres, algunos usados antes o después del mismo; por ejemplo: geología cuantitativa, geología numérica, y geomatemáticas.

En el presente artículo se hablará de sólo $G \subset C$ y describirá la historia del surgimiento de la geología matemática, para luego pasar a describir el rol, las pretensiones y el potencial de ésta en la región de América latina con el fin de hacer tomar conciencia sobre la necesidad de ésta para la región.

2. Reseña histórica

La presente reseña histórica se basa en los relatos hechos por varios autores del mundo occidental. Los conocimientos y los hechos desarrollados en el mundo oriental, en la historia, también han tomado gran parte de este desarrollo. Para no entrar en mucho detalle de la historia de la matemática (que se pueden encontrar en libros más extensos sobre el tema), la reseña histórica se la hace a partir del siglo XVI mostrando algunos hitos relacionados a la geología o ramas afines. La reseña histórica de la evolución de la geología matemática es un ejemplo de la evolución que tuvo todo conocimiento en los últimos 60 años.

2.1. La geología y las matemáticas

A partir de la segunda mitad del siglo XVI los Jesuitas ven la necesidad de impartir las matemáticas en los colegios de La Orden para la formación de futuros jesuitas en el Colegio Romano. En este siglo, las matemáticas se las consideraban como una disciplina inferior a la Filosofía, Medicina o Teología; eran un tema periférico, abstracto y bello, pero alejado de la realidad de la utilidad; y además era una materia que no tomaba examen. En ese entonces el jesuita Christóforus Clavius (1538–1611) —jesuita alemán, matemático autodidacta y reputado astrónomo— critica a sus colegas de Filosofía por no saber suficientes matemáticas, y además, por no saberlas hacer atractivas.

Posteriormente, Vincenzo Figliucci, propone que la comprensión de las matemáticas acerca al hombre al conocimiento divino, permitiéndole descubrir los principios de la naturaleza y remontarse a la causa de los fenómenos. En el siglo XVII se dio las condiciones para que las matemáticas empiecen a tomar control en la explicación de los fenómenos naturales, con los aportes trascendentales de Galileo Gallilei, René Descartes (1596–1650) y Sir Isaac Newton. Los mismos jesuitas empezaron a estudiar la naturaleza de la Tierra, por ejemplo: Athanasius Kircher (1601–1680) escribió el tratado filosófico *Mundus subterraneus* (1665); donde quiso explicar el origen de los volcanes, y comparó a la Tierra como un organismo viviente.

En estas épocas todo teólogo tenía que tratar dos temas: el concerniente a Dios y el concerniente al entendimiento del mundo natural; porque al entender la creación se logra entender al creador, y esto conllevó a tener que conocer al menos dos tratados: la Biblia y el llamado Libro de la Naturaleza, este último compilado por la congregación de los Dominicos en el siglo XIII. Se dice que ambos libros, si bien fueron compilados por hombres, fueron escritos por Dios.

El estudio de la naturaleza recibió gran interés en el tiempo del Renacimiento, cuando los cristianos empezaron a redescubrir y a acoger los escritos aún remanentes de las culturas antiguas griega, romana y otras que hayan podido sobrevivir a la época Medieval. Aquellos que se especializaron en el estudio de la naturaleza los llamaron *filósofos naturales*.

Para el siglo XVIII es que se conoce el posible primer tratado de geología del mundo occidental, bajo el nombre de teoría de la Tierra, haciendo una semejanza a un tratado publicado un siglo antes por Newton llamado teoría de los cielos (*v.gr.* cosmografía). Fue en este siglo donde la experimentación empezó a tener importancia para las apreciaciones; donde se publicaron enciclopedias, y se empezaron a difundir los conocimientos del conocimiento de la Tierra en universidades, bajo el nombre de *geometría subterránea*. Posiblemente, el primer libro en idioma español sobre temas de las ciencias de la tierra fue del clérigo Antonio Torrubia con su tratado aparato para la historia natural en 1754. Y en este siglo, a finales, es donde se dio la Revolución Industrial. Para ello, la minería demandó hacia el estudio de la Tierra en las universidades.

A inicios del siglo XIX, la geología comenzó a lograr la estructura robusta de una ciencia, con las contribuciones de Abraham G. Werner (1749–1817) en el Neptunismo y mineralogía. En este siglo se tuvo los grandes aportes de James Hutton (1726–1797), quien aportó con la descripción del origen y datación de las rocas; sin embargo, la geología no alcanzó su carácter científico hasta que se logró desarrollar la estratigrafía y la paleontología; logrados a finales del siglo XIX [14]. En esta época se atendía aún la teología natural que muestra aún la influencia que tenía la religión en esta ciencia en el mundo occidental.

Solo hasta el siglo XX se puede decir que la religión y la ciencia recién se separaron completamente, de un proceso que duró al menos dos siglos, cuando al final se empezó a estudiar las Ciencias a partir de los principios físicos y no solo ser un deseo de acercarse a Dios.

Pero ¿Cómo evolucionaron las matemáticas para el siglo XIX en adelante? —A partir del siglo XIX se marca el inicio de las matemáticas modernas; sin embargo, las matemáticas entran a una fase mucho más adelantada de las otras ciencias aplicadas, entra en un campo más abstracto. Se empieza a estudiar la geometría no-euclidiana, geometría hiperbólica, geometría elíptica, geometría de Riemann y los principios de topología con las generalizaciones de las curvas y superficies. También empiezan a tratarse temas del álgebra abstracta como los espacios vectoriales y álgebra booleana. En este siglo se resuelve los problemas matemáticos que no habían sido superados desde los tiempos de la Grecia antigua, como la solución de ecuaciones polinomiales, y problemas de geometría tridimensional.

Para el siglo XX se estableció los fundamentos de la teoría de conjuntos y los fundamentos de las matemáticas. En este siglo se crearon numerosas sociedades nacionales de matemáticas en Inglaterra, Francia, Italia, Escocia y Estados Unidos; y una sociedad limitada especial conocida bajo el seudónimo de Nicolás Bourbaki [10].

En este mismo siglo también se estudia con grandes logros la automatización y computación, tales como: la teoría de la computación de Alan Turing, la teoría de la complejidad, teoría de la información de Claude Shannon, la del procesamiento de señales, de análisis de datos, y de optimización; dando lugar a la ciencia computacionales. Estas teorías computacionales han incrementado el interés en teorías discretas, combinatoria y teoría de grafos, análisis numérico y computación simbólica. Los métodos computacionales en las matemáticas que se destacan en el siglo XX son: el algoritmo simplex, la transformada rápida de Fourier, códigos de corrección de errores, entre otros.

2.2. La geología y las matemáticas

El intento de implementar las matemáticas en la geología se remonta al siglo XVII, con el trabajo del científico francés Pierre Perrault (1611–1680) que trató de explicar el Ciclo Hidrológico de forma cuantitativa en su libro *De l'origine des fontaines* [19] cuya traducción al español es *el origen de las fuentes*.

Sin embargo, fue sólo durante el siglo XIX que se creó los fundamentos geológicos para poder aplicar las matemáticas. A esta fase se la conoce la fase formativa de la geología matemática, dado entre los años 1833 a 1895 [13].

Las primeras aplicaciones concretas de las matemáticas a la geología —en ese entonces conocida como geología cuantitativa— fueron más notorias a finales del siglo XIX con las contribuciones del geólogo Charles Lyell, que se considera uno de los padres de la geología moderna [12].

Por ejemplo, la proyección esférica equiángulo —que es una transformación del espacio euclídeo tridimensional al esférico bidimensional, v.gr. una aplicación de la geometría no-Euclidiana— se aplicó en geología a finales del siglo XIX. A principios del siglo XX, en 1917, se publicó en idioma Alemán el trabajo del geólogo Austriaco Walter Schmidt donde se establece un método —con base a la proyección esférica equiárea— para inferir por medio de la estadística las concentraciones de las orientaciones tridimensionales de planos de discontinuidades en la roca, lo que marcaría el inicio de la aplicación de la estadística multidimensional [16]. Luego en 1953, Fisher [5] publicaría la expresión matemática de una distribución espacial axial en la superficie de la esfera, que permitiría el inicio de la aplicación de la estadística paramétrica en esta proyección.

Para mediados del siglo XX se matematizaron algunos fenómenos geológicos, a esta fase se la conoce como la fase de explotación, dada entre los años 1941 a 1985 [13]. En Schaeben [15] se explica un caso particular referente a los primeros logros de la matematización en las Ciencias de la Tierra. Se trata de un modelo matemático para la predicción del clima en meteorología. Inicialmente, en 1922, Richardson planteó las ecuaciones diferenciales para la predicción del clima; sin embargo, las ecuaciones no tenían solución analítica.

Richardson al plantear tal ecuación no previó de la complejidad del problema ni de las condiciones de estabilidad de la solución numérica, él se había adelantado a la época del uso de los computadores. Solo se logró avanzar en el modelo hasta mediados de 1940 donde Neumann tuvo acceso a un computador diseñado especialmente para la predicción del clima; vea [3]. Con esto el autor quiere resaltar, que no existe matematización sin materialización; y la primera no es útil si no procede luego la concretización e implementación.

Para mediados del siglo XX, se pasó a una nueva etapa: la del desarrollo (entre 1941 a 1958 [13]) de los conceptos fundamentales que definen la geología matemática. Importantes personas que impulsaron esta fase fueron: Andrew B. Vistelius (natural del entonces U.R.S.S.) y William C. Krumbein de la Universidad del Noroeste en Illinois (natural de EE.UU.). Vistelius desarrolló formalmente estudios bajo el título de geología matemática en la década de los 50 y 60 de ese siglo (e.g. Vistelius [17]); y Krumbein empezó con estudios de estadística aplicados a la geología (estratigrafía) en la década de los 30, quien fue un pionero en geología computacional (sinónimo de la que Vistelius llamó geología matemática) en los años 60 con la

ayuda de la oficina de Investigaciones Navales de EE.UU. (e.g. Krumbein & Sloss [6]).

Entre 1958 a 1970, se desarrollaron los primeros códigos computacionales para solucionar problemas geológicos: v.gr. uso de la matemática y la informática en la geología ayudados por los conceptos e impulso dado en la fase de desarrollo. Esta época es llamada la fase de la *computación aplicada a la geología*. Esta podría decirse que fue la fase que mayor evolución tuvo, donde se obtuvieron resultados concretos que hizo ver que este campo era prometedor.

Los grandes problemas con los que se contó en esta fase fueron: la compatibilidad del hardware entre las naciones, y por ende la compatibilidad del software. Sólo por estrategia militar, algunas naciones desarrollaron su propio hardware (v.gr. URSS, EE.UU., Inglaterra, Francia, Dinamarca, Alemania y Suecia) y eso implicaba el desarrollo de sus propios sistemas operativos. Respecto al software, Merrian [11] señala en un comunicado: que los más grandes problemas que se tuvo en esa época para el intercambio de algoritmos fue la compatibilidad del software. Por ejemplo, mientras en EE.UU. se programaba en mayoría las aplicaciones en las Ciencias de la Tierra en FORTRAN; en Europa la tendencia era el uso de ALGOL o AUTOCODE.

Para mediados de los años sesenta se publicaron alrededor de cien artículos relacionados a la aplicación de la informática en la geología; y con la mejora en la disponibilidad y en la velocidad de los computadores, para el inicio de los años setenta se tenían alrededor de mil artículos sobre el tema.

Este gran impulso de la fase de la computación aplicada a la geología se debe a la unificación de los esfuerzos comunes en la temática (e.g. comunicaciones GOSSIP: *Geological Oriented Scheme for Sharing Information on Programming*) y a la creación de sociedades internacionales; que para el caso en particular fue la Sociedad Internacional de Geología Matemática. Esta sociedad se fundó formalmente en Praga para el año 1968 de la mano de Daniel F. Merrian (del Servicio Geológico del Estado de Kansas en EE.UU.) y Richard Remet de Suecia, que cambió de nombre a la actual Sociedad Internacional de Geociencias Matemáticas (*International Association of Mathematical Geosciences*, IAMG de las siglas en Inglés).

Todos los desarrollos internacionales permitieron unificarse tras el establecimiento firme de dos revistas exitosas relacionadas a las matemáticas e informática dirigida por la IAMG: Geología Matemática (*Mathematical Geology*) y Computadores & Geociencias (*Computers & Geosciences*). En estas dos revistas se publican y se intercambian programas computacionales a nivel de código fuente; sin embargo, ya años atrás a los sesenta (aproximadamente diez años atrás) se intercambiaban códigos de solución de problemas de geología entre colegas, estudiantes e investigadores [9]. Se

marcó la lógica del software libre, como ocurrió en otros campos al inicio de la informática.

Ya para la década de los ochenta el lograr un registro impreso de las aplicaciones de la informática a la geología se convirtió en una tarea poco práctica [12]. Se estima que se publicó por el orden los miles de publicaciones y códigos abiertos relacionados a la geología matemática; en revistas indexadas y en congresos especializados al tema. Hoy en día en la red Internet se pueden encontrar la mayoría de estos códigos, muchos de ellos escritos en Fortran; donde la tarea actual puede ser una actualización del código a los lenguajes de programación actuales.

Para la última década del siglo pasado hasta el presente se entra en una fase oscura a causa de la fase de explotación comercial de los códigos computacionales, que la llamaría la fase de la era oculta (v.gr. *Digital Dark Age*) de los códigos computacionales; apoyado por el concepto que: todo código cerrado compilado necesita de su programa intérprete para descodificarlo, donde muchos de estos programas descodificadores han desaparecido en pasar del tiempo y donde los archivos de los códigos ha permanecido.

En esta fase es donde se observa también un interesante gran avance, pero sin tener realmente una visión clara si ese avance podría haber sido mayor si se establecía en el mundo de la informática con mayor impulso el criterio de código libre o abierto.

2.3. La geología matemática del siglo XXI

Para este siglo XXI se tiene anunciado desde el año 2000 los siete problemas sin resolver de las matemáticas, y ya en el 2006 uno de esos problemas —la conjetura de Poincaré— fue resuelta; y por supuesto con la conformación y uso de un programa computacional.

Este inicio de siglo se caracteriza por tener en todas las áreas de investigación grandes cantidades de datos (v.gr. *bigdata*) para ser procesados; y esto aplica también a la geología, debido a que las computadoras han catalizado la revolución cuantitativa en la geología y ellas posibilitan que se aplique las matemáticas y los modelos estadísticos a estos grandes volúmenes de datos e información [2]. Por ejemplo, en las agencias de la NOAA y la USGS se tiene almacenados grandes cantidades de datos obtenidos por los satélites y sensores terrestres.

La computación es la llave para posiblemente unificar el entendimiento de todo el universo a través del lenguaje matemático. Las grandes potencias con sus científicos asociados están concentrando sus esfuerzos en poder lograr el procesador cuántico eficiente¹; debido a que el paradigma de la computación cuántica ya fue resuelto. El gran obstáculo en el procesador cuántico es el de aislar el quantum bit (*i.e.* qubit) de las perturbaciones del mundo físico para que se produzca el entrelazamiento cuántico; que sólo se logra a

¹ Ya existe procesadores cuánticos, pero todos no son tan eficientes como la teoría cuántica lo prevé; por ejemplo, el procesador D-Wave 512 qubit que trabaja en el computador D-Wave Two de Dwave Systems Canadá, es una implementación basada en *quantum dots*: una estructura construida en un

semiconductor que es capaz de confinar electrones en tres dimensiones de tal forma se obtiene niveles de energía discretas, es decir se puede decir que son átomos artificiales cuyas características se pueden controlar [7].

pocos grados de temperatura absoluta por encima del cero absoluto. Con este procesador eficiente se podrá resolver muchos problemas aún no tratables desde el punto de vista de la implementación; como por ejemplo, problemas de criptografía (v.gr. *quantum key distribution*), nanotecnología, optimización y aprendizaje automático.

El paradigma de programación para una computadora cuántica es muy diferente que el que se usa para programar una computadora tradicional; consiste en encontrar la relación de un cálculo que menor energía requiera a partir de la búsqueda simultánea de la solución del problema en una vasta cantidad de posibilidades. De este modo, cada cálculo computacional es probabilista más que determinista, donde el computador envía un conjunto de correctas soluciones en un tiempo muy corto (alrededor de millones de respuestas por segundo). Para el caso de las primeras computadoras cuánticas como el *D-Wave Two* de Dwave Systems, se está desarrollando lenguajes de programación para trabajar bajo este paradigma.

Por otro lado, aparte de tener más hardware eficiente, es necesario cada vez simular más acertadamente mediante software amigable y eficiente, la forma como opera el cerebro humano. Para ello se necesitaría lo siguiente.

1. Incrementar más los métodos inteligentes, i.e. los procesos computacionales en el cual el comportamiento previo del medio geológico se estudie mediante una descripción que va mejorando a medida que se tienen mayores datos, mediante una red informática con nodos interconectados. Esto podría lograrse con redes neurales artificiales a tiempo real.
2. Desarrollar programas computacionales inteligentes que incluyan algoritmos de percepción de la situación que se estudia.
3. Crear el hardware necesario para lograr estas capacidades accesibles a cualquier persona. Hoy en día se puede comprar en un equipo computacional el equivalente del cerebro de un insecto o un ratón por mil dólares; se prevé, que con ese mismo monto dentro de 50 años se pueda comprar el equivalente al cerebro humano.

En lo que respecta la información, se estima que en menos de 20 años se tendrá disponible en la red Internet casi la totalidad de los libros que se han publicado en el pasado y que salgan en ese presente (predicción personal del autor). Se cree que las computadoras serán autores de textos mediante una compilación inteligente y manejo de la información; y los artículos tendrán autores mixtos entre humanos y cibernéticos; surgirá la figura del científico electrónico (*e-scientist*).

Los computadores tendrán memoria, percepción e inteligencia. La solución de los modelos será en tiempo real con la toma de datos del medio ambiente a través de una red de sensores, y no se necesitará la intervención del hombre para dar los valores de las variables de entrada al modelo. Esto ya se está usando en las exploraciones no tripuladas de Marte, por ejemplo.

El conocimiento siempre dio lugar a las grandes potencias; por tanto, el desarrollo de este nuevo reto está siendo tratado con bastante sigilo y confidencialidad. Es muy probable que se tenga resueltos hitos más avanzados de lo que hoy en día se cree se conoce en los medios comunes de

comunicación. El conocimiento humano está creciendo, y el cerebro humano aún está limitado.

3. Matemización de la geología

La *matematización* es un proceso que diseña y desarrolla modelos conceptuales basados en leyes de la naturaleza en notación matemática. Es decir, un proceso por el cual el científico transforma lo observado de la naturaleza en un modelo matemático. En forma sencilla, es la reducción de algún fenómeno a expresiones matemáticas interrelacionadas. Un modelo matemático puede estar planteado inclusive a partir de funciones variables, dando varias formas de solucionar o varias soluciones.

Durante la matemización no sólo se trata de entender el proceso, sino de encontrar las variables que más influyen en el proceso, y las relaciones entre éstas, expresadas a través del correcto lenguaje matemático. La *concretización* es el proceso inverso a la matemización y es el proceso de transferir un modelo matemático a la realidad.

Mediante la matemización se logra realmente aplicar las matemáticas. Sin embargo, para matematizar la geología es necesario tener conocimientos y pericia en los dos aspectos que involucran esta relación: en las ciencias que describen la naturaleza y en las ciencias matemáticas. Asimismo, el proceso de matemización sugiere seguir un procedimiento o una metodología que involucre una formulación lógica de los hechos, un adecuado uso del lenguaje literal y matemático, una búsqueda de analogías entre la situación estudiada y otras situaciones, y el ordenamiento progresivo del razonamiento. Y esta característica hace que el proceso de matemización no sea una tarea sencilla por ser un proceso elaborado; es más, se ha visto difícil encontrar profesionales con ambas notables capacidades.

Dentro de los pasos del proceso de matemización, uno inicia con un mapa conceptual del problema (que puede ser un esquema hirsuto, un diagrama de flujo con parámetros de entrada y salida), un listado de suposiciones, la introducción de las variables y sus unidades, la identificación de las relaciones de estas, la clasificación de la importancia de las variables y eliminación de algunas innecesarias, y la identificación de uno o más procesos. Por ejemplo, tienen que definirse si realmente los procesos son estáticos o transitorios, y si se las relaciones entrarán en el campo continuo o discontinuo.

Para lograr la matemización de un cierto problema de la naturaleza, se pasa por un proceso largo de entrenamiento, trabajo multidisciplinario, y varias pruebas y errores. Es más, es un trabajo de toda una comunidad científica, que se han trazado el objetivo de ir marcando hitos a través de sus logros.

Para el nivel de los problemas que se quiere resolver en la actualidad en la geología matemática, se ve que el proceso de matemización no se logra con un individuo; hoy en día el trabajo multidisciplinario y conjunto es la única vía de lograr la matemización de problemas.

Se necesita por lo menos tres actores para lograr la matemización de un problema en geología matemática; estos son: un científico de la rama de la geología, un matemático y estadístico, y un desarrollador de software (Fig. 1).



Figura 1. Diagrama de la terna de interacción para solucionar problemas.
Fuente: el autor.

En la Fig. 1, los dos individuos (Usuario y geocientífico) que no son netamente matemáticos ni estadísticos necesitan tener conocimientos básicos de esas ramas; el matemático y el desarrollador de software necesitan tener conocimientos básicos de las Ciencias de la Tierra; y los tres tienen que saber programar en un lenguaje de programación de prototipaje. Es el desarrollador de software el que agrupará y cumplirá con las necesidades del demandante de la aplicación a partir de todos los insumos logrados por los demás investigadores a partir de los códigos prototipos desarrollados.

En todo ello, se tiene que lograr en el grupo multidisciplinario un interés común y a la vez un beneficio para cada uno de los integrantes. Lo que se observa muchas veces en estos grupos de investigación multidisciplinario es la pérdida rápida de interés por alguno de los especialistas. Normalmente esto sucede con el especialista en matemáticas. El matemático desea aplicar sus conocimientos en geología, pero muchas veces los problemas que plantea la ciencia resultan ser soluciones triviales para las matemáticas; por tanto el matemático pierde el interés en resolver el problema.

Todos los miembros del grupo multidisciplinario tienen que comprender que a medida que se progresa en el problema se llegan a modelos interesantes para todos. La matematización y la solución de un problema en geología matemática toma su tiempo, consume energía y requiere perseverancia de todos sus miembros.

4. La geología matemática en Latinoamérica

Los estudiantes y profesores de las universidades latinoamericanas tienen todavía muchos aspectos que frenan el desarrollo de la geología matemática desde la academia; y si desde la academia no se resuelve la implementación de las matemáticas en la geología, muy difícil será poder introducir esta nueva forma de trabajo en la industria.

Los aspectos que frenan este desarrollo en la academia son por ejemplo los siguientes:

1. Muchos estudiantes consideran a la matemática como una disciplina compleja, abstracta y bien desvinculada de su interés profesional. Lo de compleja y abstracta es totalmente cierto, pero lo de desvinculada no lo es.

2. Todavía los estudiantes quieren resolver grandes problemas con herramientas de ofimática, tales como MS-Office.
3. No se posee la experiencia en la manipulación de grandes bases de datos (*i.e. bigdata*).
4. La enseñanza informática para los geólogos se limita a lo básico y no se les proporciona los conocimientos necesarios para elaborar sus propios programas computacionales.
5. Se les enseña a resolver problemas de forma manual mediante nuevas tecnologías de información, y generalmente se les evalúa para responder con cálculos manuales sin el uso de las nuevas tecnologías de información.

Hace sesenta años la geología no tenía una cercanía alguna con las ciencias exactas y las matemáticas. Inclusive, todavía aquella impresión aún es remanente en el entorno académico de alguna de las universidades latinoamericanas. Se tiene la impresión que tanto las matemáticas como la estadística no son afines con la geología; y esto porque se piensa aún que las matemáticas son abstractas en comparación con la geología que es una ciencia concreta.

Se cree, que esta brecha se está debiendo a las siguientes razones.

1. Las matemáticas tienden a generalizar un comportamiento, mientras que los aspectos que trata la geología son esencialmente singulares y hasta únicos.
2. Los problemas en la geología no son únicos, las personas tienden a favorecer más a un modelo que a otro, bien sea por simpatía, por desconocimiento o alguna otra preferencia. Esto causa un gran sesgo en la geología.
3. Similar a lo anterior, la geología bajo una deficiente práctica podría ser hasta cierto punto personal e individual, debido a que a veces ciertas apreciaciones son enteramente de carácter personal.
4. La geología, en contraste con otras ciencias, busca las causas a partir de los efectos; mientras que las ciencias clásicas estudian lo contrario: los efectos con sus causas. Esto resulta en que la mayoría de los problemas en geología son *problemas inversos*, por tanto no se cumple el *principio de la causalidad*, y esto tenderá a una respuesta ambigua.
5. La geología tiende a *idealizar razonablemente*, es decir trata de explicar de forma racional los fenómenos a partir de idealizaciones. Casi como la teología, que parte de ciertos dogmas aún no comprobados. Esto resulta así porque en geología muchos modelos o teorías son modas. Un claro ejemplo es la teoría de sinclinales y geosinclinales, otro ejemplo es el de deriva continental; solo cuando se tomaron datos fue que se favoreció la teoría de tectónica de placas.
6. La experimentación en geología es limitada por el efecto escala y tiempo.

La concretización de las matemáticas en la geología se está logrando cada vez más con el uso de la informática; debido a que hoy en día se puede individualizar y singularizar un grupo de cálculos matemáticos (v.gr. un procedimiento) y hasta un modelo. En este aspecto el desarrollo de algoritmos

prototipos no triviales son los medios a través de los cuales se están logrando avanzar hacia adelante en temas nuevos e importantes de la geología.

Entonces, corresponde a la academia a nivel universitario la tarea de enlazar nuevamente los siguientes conocimientos: física, química, matemática y estadística, en conjunto con la aplicación de métodos numéricos y técnicas de programación computacional (posiblemente esto resulte en la inclusión de al menos seis nuevos campos del conocimiento) dentro de la enseñanza de la geología, y como consecuencia en la enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

La realidad observada en las universidades latinoamericanas es que prácticamente, aquel individuo interesado en enlazar ahora los seis campos del conocimiento científico tiene que volver a estudiar unificando los conocimientos hacia un fin en específico: la solución de un problema real para cubrir una demanda urgente a ser cubierta por el mercado tecnológico del medio, o para desarrollar conocimiento nuevo mediante investigación.

Otro problema que hay destacar es la forma como Latinoamérica accedió a los recursos informáticos y hacia la aplicación de esta en las ciencias. En los últimos treinta años, en Latinoamérica no se percibió claramente la necesidad de unir los conocimientos de física, química, matemática y estadística. Es más, en el transcurrir de estos años no fue un problema catastrófico desde el punto de vista del conocimiento en la región. Todos los profesionales y académicos nos hemos beneficiado con el desarrollo de estas ciencias de la mano de la informática; y esto fue así debido a que la demanda del conocimiento para enlazar todos estos temas se cubrió con los programas computacionales que hacen todo, pero cerrados tipo caja negra, y de llave en mano (en este caso de licencia en mano); que podríamos decir: una *solución facilista* y a su vez costosa en términos económicos.

Un programa computacional bien desarrollado es capaz de transmitir conocimiento sin mucho esfuerzo hacia el usuario; y sin exigirle de los pormenores y detalles del conocimiento. Pero esto hizo que en Latinoamérica no se vea la necesidad del desarrollo de software propio; que es una tarea mucho más complicada que requiere un gran proceso de desarrollo.

La solución facilista —pero no consensuada— de la academia (docentes y estudiantes) en las universidades latinoamericanas fue el de tolerar la piratería del software en los pasillos y en las aulas; y no más bien de desarrollar capacidades de su personal académico con el fin de lograr lo más antes posible la unificación de estas ciencias en los niveles académicos más tempranos posibles. Pensado ya en aquellos científicos que han optado por el desarrollo de conocimiento, v.gr. los investigadores, ellos tienen que encarar el reto de enlazar los mencionados seis campos del conocimiento, y como se dijo: lo antes posible y en los niveles académicos más tempranos posibles. A nivel académico, tal enlace es necesario hacerlo en los cursos de post-grado, desde una maestría investigativa hasta el doctorado; teniendo seis años para lograr aquello.

Soluciones para lograr el enlace de los ahora seis conocimientos mencionados emergieron dentro de la

geología mediante ramas del conocimiento especializadas. Por ejemplo, la Geofísica que trata de enlazar la Física con la geología; o la Geoquímica, con similar objetivo. Este último par de disciplinas (Geofísica y la Geoquímica) están exigiendo tanto el uso de las matemáticas, estadística y computación; que hicieron surgir lo que trataremos ahora: la geología matemática.

En la reseña histórica referente a las matemáticas y la geología, como las ciencias de la computación direccionados al surgimiento y desarrollo de la geología matemática no se observó ninguna influencia de Latinoamérica, situación que es distinta por ejemplo de los países Europeos.

La reacción que tuvo Latinoamérica ante el surgimiento de la geología matemática hasta finales de los años ochenta del siglo pasado no fue notoria; y solo a partir de la década de los noventa se adopta una política general de introducir los computadores dentro de la geología.

Sin embargo, las malas decisiones de aquel entonces fueron:

- importar programas computacionales de códigos cerrado, todos ellos costosos para el nivel de adquisición de las universidades, empresas públicas y privadas;
- asumir tales herramientas (cajas negras) como insumos fundamentales para desarrollar la investigación local, sin antes percibir que era necesario desarrollar las capacidades de los científicos para lograr aquello.

Otro aspecto que influye en tener profesionales de las Ciencias de la Tierra con pocas capacidades hacia la física, química, matemática y estadística se da en las materias de fundamentación de la educación superior en las carreras que tienen un componente orientados hacia las ingenierías y ciencias. Es una deficiencia aún presente que en los numerosos cursos básicos de física, química, matemática y estadística se aborden temas generales no atractivos para los estudiantes de cada determinada carrera. Muchos de los problemas que se trata y se resuelve en estos cursos se hacen mediante soluciones analíticas bien conocidas; pero largas, engorrosas y de casos especiales: casos especiales que pueden ser simplificaciones poco aplicables de un fenómeno real, o casos especiales cuyas soluciones se apoya en un método de solución específico diseñado solo para esas situaciones. Cuando es el momento de aplicar los conocimientos de física, química, matemática y estadística en temas específicos de las disciplinas relacionadas a la geología, nos encontramos que existe un vacío entre lo aprendido en las materias básicas, y en lo que realmente se necesita conocer.

A continuación, se presenta algunos indicadores de la situación actual de las capacidades de los estudiantes universitarios para aplicar las matemáticas en la geología en Latinoamérica.

El primer aspecto es referente a la percepción de la necesidad de las matemáticas para la geología. En la Universidad Nacional de Colombia se realizó una encuesta a estudiantes de la carrera de ingeniería geológica de la Facultad de Minas, la cual indagaba ¿Cuánta matemática se necesita para ser geólogo o ingeniero geólogo? —Para poder

analizar las repuestas, se les pedía a los encuestados que escogieran sólo una opción de las siguientes seis opciones; a nivel:

- avanzado de álgebra, precálculo;
- avanzado de lo anterior y geometría del espacio (geometría tridimensional);
- avanzado de lo anterior y álgebra vectorial, matricial y tensorial;
- avanzado de lo anterior y el análisis matemático de ecuaciones diferenciales parciales, hasta la dimensión R^4 ;
- intermedio de lo anterior y estadística descriptiva en R^n ; o
- intermedio de lo anterior y topología.

De las 113 respuestas: 2 no respondieron nada (blancos); 4 marcaron más de una opción (nulos); 1 dijo a nivel avanzado de álgebra, pre-cálculo; 2 escogieron a nivel avanzado de lo anterior y geometría del espacio (geometría tridimensional); 11 escogieron para el nivel avanzado de lo anterior y álgebra vectorial, matricial y tensorial; otros 11 para el nivel avanzado de lo anterior y el análisis matemático de ecuaciones diferenciales parciales, hasta la dimensión ; 25 para el nivel intermedio de lo anterior y estadística descriptiva en ; y los restantes 57 optaron por elegir el nivel intermedio de lo anterior y topología.

El segundo aspecto que se indagó fue a ¿Cuáles son las capacidades en el manejo de herramientas computacionales específicas que tienen los estudiantes interesados en la geología matemática? —Para este caso, se convocó a los estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia a participar de las actividades del Semillero de Investigación en Geología Matemática y Computacional (GeolMathComp), que se desarrolla en la Facultad de Minas. En dicha reunión se les solicitó que los interesados llenen una encuesta sobre las herramientas computacionales que ellos pueden manejar para el desarrollo de programas aplicados a la geología.

De los 21 encuestados, 8 sabían manejar algún lenguaje de marcas como LaTeX o HTML; sólo 9 reportaban manejar algún lenguaje de programación como C++, Python, Octave o Matlab; 10 indicaron que conocían alguno de los entornos de programación como Eclipse, Qt4 o Visual Basic; y sólo cuatro indican manejar el lenguaje SQL.

A este mismo grupo de interesados, se les solicitó indicar en qué áreas del conocimiento deseaban ayudar dentro del grupo de investigación. De los 21 encuestados, 10 deseaban ayudar únicamente en temas netos de geología (sin matemáticas); mientras que sólo 6 deseaban incursionar en temas de matemáticas o estadística relativos a la geología; el resto quiere ayudar en temas secundarios a los objetivos del grupo como ser desarrollo de documentos de información impresos y/o electrónicos con el uso de herramientas ofimáticas, o en temas administrativos. En este último aspecto, es importante mencionar que un estudiante no debe limitarse al buen y avanzado uso de las herramientas ofimáticas, esto debido a que la necesidad de incursionar en el uso de los lenguajes de programación en los estudiantes de carreras relacionadas a las Ciencias de la Tierra cada vez está siendo más notable [8].

Finalmente a un grupo de 72 estudiantes de pregrado de la misma universidad y facultad se les solicitó matematizar un problema simple de álgebra de vectores en R^2 . De éstos, sólo 13 usaron diagrama de flujo o pseudocódigo para matematizar el problema; el resto usó lenguaje literario y esquemas para tratar de explicar el procedimiento de la matematización. Estas tres indagaciones (i.e. ¿cuánta matemática se necesita para ser geólogo o ingeniero geólogo?, la capacidad en el manejo de herramientas computacionales específicas, y la capacidad de matematizar un problema) indica que existe muy bajo conocimiento de los alcances que tiene la matemática hacia la geología, muestra la baja formación computacional que se tiene para lograr implementar la matemática a la geología, y el bajo lenguaje matemático y baja capacidad que se tiene para matematizar un problema.

5. Epílogo

Varias frases han surgido de los amantes de la matemática; se toma a un autor que escribe mucho sobre ella [1]:

- la matemática es la reina y sirviente de la ciencia, la ciencia de las ciencias, el único y decisivo medio para la formulación y la solución de todos los problemas independientes del campo;
- la matemática es todo un lenguaje, el más preciso lenguaje disponible para las personas de hoy, un lenguaje que con sus fundamentos y desarrollos ha seguido reglas lógicas, un superlenguaje;
- el nivel de una ciencia se determina por la extensión del uso del lenguaje matemático por esta ciencia;
- cualquier ausencia, falta de claridad, imprecisión, o duda que se acredite a las definiciones y el procesamiento de los conceptos en un campo científico se debe sustancialmente al hecho que no se ha triunfado en el uso exclusivo del lenguaje matemático en esos temas;
- la fundamentación axiomática y estricta, así como la preparación para la matematización es una necesidad interna para cualquier rama de la ciencia.

El nivel de conocimiento que se requiere de la física, química, matemática y estadística para el desarrollo de las Ciencias de la Tierra y la geología no es de nivel básico, como se presenta en los cursos de los primeros semestres de las carreras universitarias ya descritas. De este modo se tiene que lograr lo siguiente.

1. En la academia es necesario desarrollar en los profesionales los suficientes conocimientos de las ciencias básicas, las matemáticas y la estadística, para aplicarlas a las Ciencias de la Tierra con el apoyo de las capacidades de desarrollar códigos computacionales.
2. Es necesario establecer un esquema en los centros de investigación de tal modo de lograr software propio y de código abierto, aplicados a solucionar desde los problemas más simples hasta los más complejos que demandan las investigaciones.
3. Actualmente la tecnología de la electrónica y la informática se está transfiriendo de forma eficiente hacia

el continente Asiático, quedando al margen de la competencia informática a África y Latinoamérica. Es necesario iniciar con el proceso de empoderamiento de esos conocimientos en la región si se desea ser parte del desarrollo de la ciencia y tecnología en los siguientes 50 años.

En las universidades se necesita lograr lo siguiente.

1. Incentivar hacia el desarrollo de software propio, libre y abierto; y al intercambio de códigos abiertos desarrollados en la academia.
2. Desarrollar más las capacidades de su personal académico con el fin de lograr lo más antes posible la unificación de la física, química, matemática y estadística en los niveles de postgrado: desde una maestría investigativa hasta el doctorado.
3. Transmitir esas capacidades desde los estudiantes de postgrado para entrenar a los de estudiantes de pregrado.

A nivel gubernamental se tendrá que crear la tradición en el desarrollo de esta ciencia y definir políticas educacionales para entrenar esta ciencia a temprana edad.

Y a nivel personal se necesita tener predisposición; paciencia y resiliencia; hacer matemáticas no es fácil ni para el más experto.

Referencias

- [1] Apostolatos, N., Applied mathematics and parallel computing, Informatics and the internal necessity for the mathematization of the sciences, Physica Verlag, 1, 10, 1996, Munich, 1, Feb.
- [2] Bonham-Carter, G.F., Nemec, V., Merriam, D.F., Pengda, Z., Cheng, W., Bonham-Carter, G. and Cheng, Q., Progress in geomathematics, The role of Frederick Pieter Agterberg in the development of geomathematics, pp. 5-12, Springer, Berlin, 2008.
- [3] Charney, J.G., Fjörtoft, R. and Neumann, J.V, Numerical integration of the barotropic vorticity equation, Tellus, 2, pp. 237-254, 1950.
- [4] Deming, D., Pierre Perrault, the hydrologic cycle and the scientific revolution, Groundwater, 52(1), pp. 156-162, 2014.
- [5] Fisher, R., Dispersion on a sphere, Proceedings of the Royal Society of London, 217(1130), pp. 295-305, 1953.
- [6] Krumbein, W.C. and Sloss, L.L., High-speed digital computers in stratigraphic and facies analysis, Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 42(11), pp. 2650-2669, 1958.
- [7] Le Bellac, M. A short introduction to quantum information and quantum computation (1 Ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [8] Lin, J.W.-B., Why Python is the next wave in earth sciences computing, Bulletin of the American Meteorological Society, pp. 1823-1824, 2012, DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00148.1.
- [9] Loudon, V., Computing techniques in geology, Personal conversation with the author, 2014, Jan, Mathematical Geology.
- [10] Mashaal, M., Bourbaki: A secret society of mathematics. Providence, Rhode Island: American Mathematical Society, 2006.
- [11] Merriam, D.F., Computer use in Europe, Geotimes, 12(9), pp. 14-16, 1967.
- [12] Merriam, D.F., Bibliography of computer applications in the earth sciences, 1948-1970, Computers and Geosciences, 14(6), pp. 5-6, 1988.
- [13] Merriam, D.F., Andrei Borisovich Vistelius: A dominant figure in 20th century mathematical geology, Natural Resources Research, 10(4), pp. 297-304, 2001.
- [14] Puche-Riart, O., R.C. Selley, L.R.M. and Cocks, I.R., Plimer, Encyclopedia of Geology, History of Geology up to 1780, pp. 167-172, Elsevier, London, 2005.
- [15] Schaeben, H., Geology and mathematics: Progressing mathematization of geology, Geologische Rundschau, 77(2), pp. 591-607, 1988.
- [16] Schmidt, W., Statistische methoden zur gefügeuntersuchung kristalliner schiefer. Wien: Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch, 1917.
- [17] Vistelius, A.B., Studies in mathematical geology. New York: New York Consultants Bureau. Translation of selected articles of Vistelius from Russian to English, 1967.
- [18] Vistelius, A.B., Mathematical geologists and development of the geological sciences, Mathematical Geology, 8(1), pp. 3-8, 1976.
- [19] Perrault, P., De l'origine des fontaines. Paris: Pierre le Petit, 1674.

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 Ingeniero Civil de la Universidad Mayor de San Andrés de Bolivia (UMSA). Es profesor asistente 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: 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. ORCID: 0000-0002-9760-0277.

Geotechnical variations on a tropical soil produced by municipal solid waste leachate

Alejandro Quintero-Ramírez^a, Yamile Valencia-González^a & Luis Augusto Lara-Valencia^a

^a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, Colombia. alejandroquinteror@gmail.com, yvalenc0@unal.edu.co, lualarava@unal.edu.co

Received: June 07th, 2016. Received in revised form: November 1st, 2015. Accepted: December 7th, 2016.

Abstract

Solid waste disposal has become a problem for municipal administrations due to the population growth and the limited availability of land for such uses, furthermore, the increase of rainfall for long periods produces a large amount of leachate that requires a proper disposal. This study was carried out to analyze the effect of municipal solid waste leachate in soils, in this way, different tests of physical, chemical, mechanical and mineralogical properties were performed on two samples of a residual soil from the Batolito Antioqueño, located in Rionegro city. For the first sample, geotechnical characterization tests were executed in the natural soil condition. On the other hand, the same tests were implemented in the second sample after go through a leachate process. Were found important variations in the properties of the soil affected by the process of contamination when compared with the properties of the natural soil condition.

Keywords: Leachate, solid waste, tropical soils.

Variaciones geotécnicas en un suelo tropical causadas por los lixiviados de residuos sólidos urbanos: Escala laboratorio

Resumen

Debido al alto índice de crecimiento de población que enfrentan las grandes ciudades, la disposición de residuos sólidos se ha convertido en un problema para las administraciones debido a la baja disponibilidad de tierra para tales usos; sumado a ello, el incremento de las lluvias por largos periodos genera una gran cantidad de lixiviados que requieren de una adecuada disposición. Para estudiar el efecto que pueden generar estos lixiviados de los residuos sólidos en los suelos, a escala de laboratorio se han realizado diferentes ensayos de caracterización física, química, mineralógica y mecánica sobre dos muestras de un suelo residual del Batolito antioqueño, ubicadas en el municipio de Rionegro-Antioquia. A la primera muestra se le efectuaron ensayos de caracterización geotécnica en estado natural y a la segunda muestra se le efectuaron los mismos ensayos pero después de someterla a un proceso de lixiviación. La metodología consistió en colocar la muestra de suelo inalterado dentro de un recipiente al cual se agregó una tercera parte del tamaño de la muestra de suelo, en cantidad de residuos biodegradables durante un mes. Este proceso de lixiviación mostró importantes variaciones en las propiedades físicas, químicas y mecánicas al compararla con la muestra en estado natural, producto del proceso de contaminación al que fue sometido el suelo.

Palabras claves: Lixiviados, residuos sólidos, suelos tropicales.

1. Introducción

El estudio de los suelos tropicales en Colombia ha sido poco abordado en el campo de la ingeniería, debido principalmente a la gran variabilidad y complejidad en las propiedades que presentan los suelos de estas regiones. Esto se evidencia en gran parte de las obras de ingeniería, en las cuales se implementan modelos de la mecánica clásica de

suelos, lo cual ha propiciado la falla de grandes proyectos a lo largo de todo el territorio Colombiano. Por tal motivo, en esta investigación se aborda un caso particular de estudio en un suelo tropical perteneciente a la unidad geológica del Batolito Antioqueño, ubicado en el municipio de Rionegro-Antioquia. Específicamente, se simuló a escala de laboratorio para un mayor control de los procesos, la contaminación de un suelo, con el fin de analizar las alteraciones físicas,

How to cite: Quintero-Ramírez, A., Valencia-González, Y. & Lara-Valencia, L.A., Variaciones geotécnicas en un suelo tropical causadas por los lixiviados de residuos sólidos urbanos: Escala laboratorio. Boletín de Ciencias de la Tierra, (41), 40-47, 2017.

químicas, mineralógicas y mecánicas de los suelos tropicales de la región cuando están en contacto con los lixiviados provenientes de desechos orgánicos; implementando diferentes ensayos de laboratorio a muestras de suelo en estado natural y contaminada que permitan realizar una comparación entre los resultados obtenidos.

Se espera que esta investigación contribuya al entendimiento de las alteraciones que se generan en un suelo contaminado, al manejo que se le debe dar a los residuos orgánicos y a su disposición, a los cuidados que hay que tener con los lugares que en un futuro sean destinados para la disposición de estos residuos, y al desarrollo de métodos de prevención de riesgos que puedan ser causados por los malos manejos que se le da hoy en día a los residuos sólidos.

2. Marco teórico

2.1. Residuos y contaminación

Entre los diferentes tipos de contaminantes que existen se encuentran los residuos orgánicos, los cuales están compuestos en su mayoría por materiales que pueden afectar las propiedades geotécnicas de los lugares donde son depositados.

Los residuos sólidos pueden ser clasificados según su peligrosidad en tres diferentes clases; peligrosos, inertes y no inertes, esta clasificación depende en su mayoría de la composición química de los materiales de desecho [1], dicha composición se describe para la clase I que son los peligrosos, como aquellos que presentan riesgo a la salud pública o al medio ambiente y se caracterizan por tener propiedades inflamables, corrosivas, reactivas, tóxicas y/o patogénica. La clase II que corresponde a los no inertes, pueden tener propiedades inflamables, biodegradables o solubles; pero no clasifican como residuos Clase I o Clase III. Los residuos clase III, no tiene constituyente alguno solubilizado en concentración superior al patrón de potabilidad de aguas.

Dentro de los residuos sólidos se pueden ubicar los residuos domésticos y urbanos [2]. Los principales contaminantes de éstos residuos provienen de la descomposición de la materia orgánica presente (alrededor del 60% en peso), generando lixiviados (líquido oscuro, ácido y de alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO)). La DBO de las aguas residuales domésticas es del orden de 200 mg/l. Solo estas características le dan a los líquidos contaminantes su considerable poder agresivo con el medio ambiente.

2.2. Procesos de migración de los contaminantes en los medios geológicos

Según [2], los procesos de migración de los contaminantes dependen en su mayoría de las condiciones en las que se encuentre el lugar de disposición, ya que los contaminantes pueden viajar a través de medios porosos, medios fracturados, saturados y no saturados. Los contaminantes depositados en la superficie, atraviesan los diferentes horizontes del suelo no saturado y la zona no capilar, alcanzando la zona saturada. En la zona no saturada,

cuyos poros están llenos de agua y aire, el flujo de agua es dependiente de la fuerza de gravedad y de la forma de los poros, siendo vertidas hacia abajo. En la zona saturada, los poros están llenos de agua, el flujo es dependiente del gradiente hidráulico y los contaminantes pueden expandirse por grandes áreas y cubrir largas distancias.

Los principales procesos físicos, químicos y biológicos que controlan la migración de contaminantes son:

- Flujo subterráneo: Proceso físico en el cual las aguas subterráneas fluyen a través de los poros y las fracturas en suelos y rocas, transportando contaminantes disueltos o en solución.
- Dispersión hidrodinámica: En este proceso físico las aguas subterráneas fluyen más rápidamente en algunos poros y fracturas, produciendo esto el mezclado de aguas contaminadas con aguas no contaminadas, lo que aumenta el área afectada por los contaminantes.
- Separación gravimétrica: Es un proceso físico en el que los líquidos menos densos que el agua como la gasolina, tienden a flotar en las partes altas de los acuíferos, mientras los más densos se ubican en las partes bajas, lo que puede generar zonas de concentración en los acuíferos dependiendo de la densidad del contaminante.
- Filtración: Proceso físico donde se pueden filtrar aguas subterráneas con partículas en suspensión en el suelo y las rocas, lo que reduce la concentración de los contaminantes presentes.
- Adsorción e intercambio iónico: Éste es un proceso químico donde algunos contaminantes disueltos tienden a adherirse a las superficies de los minerales, reduciendo la concentración y la velocidad de migración.
- Reacción óxido-reducción: Proceso químico en el cual se dan alteraciones de la estructura molecular y propiedades iónicas de los contaminantes, pudiendo alterar la toxicidad, el comportamiento químico y la movilidad de los contaminantes.
- Hidrólisis: Proceso químico de reacción con el agua, lo cual altera la naturaleza iónica y molecular de los contaminantes, reduciendo su concentración.

Con relación a los procesos biológicos, se tiene la transformación microbioquímica, donde las bacterias y otros microorganismos alteran o descomponen los contaminantes orgánicos y algunos inorgánicos a través de reacciones enzimáticas y de respiración, lo que puede crear nuevos productos tóxicos.

3. Área de estudio

La zona de estudio se ubica en el Municipio de Rionegro, el cual está sobre la cordillera central, en el centro- oriente del departamento de Antioquia, específicamente a 45 kilómetros de Medellín. Hace parte de la subregión del Altiplano de Oriente que está integrada por los Municipios de El Retiro, La Ceja, La Unión, El Carmen de Viboral, El Santuario, Marinilla, Guarne, San Vicente y Concepción. Sus altitudes varían entre los 2100 y los 2600 m.s.n.m. El relieve presenta pequeñas colinas de cimas redondeadas y algunos cerros de mayor altura

y pendiente. En el occidente se presenta un sistema montañoso más pronunciado, que es una barrera física entre el Valle de Aburrá y el Altiplano de Rionegro, de donde nacen los principales afluentes del Río Negro. La precipitación promedio anual varía entre 1800 y 2500 milímetros, una temperatura media de 17°C y una humedad promedio del 90%. La zona de estudio está ubicada al norte del municipio de Rionegro, a los 6° 13' 54,47" latitud Norte y 75° 22' 56,12" de la latitud Oeste, a 2,5 km desde la entrada al municipio de San Vicente por la autopista Medellín-Bogotá. Sus suelos son originados de rocas ígneas intrusivas de carácter ácido, las cuales corresponde al batolito antioqueño, compuesto por granito (roca ígnea intrusiva plutónica de carácter ácido con abundante presencia de cuarzo acompañado de feldespato, micas, hornblenda y augita) [3].

4. Metodología

El perfil utilizado para la extracción de las muestras trabajadas revela un perfil de meteorización de suelo residual del Batolito antioqueño. El talud expone claramente cuatro estratos de meteorización. En los primeros 0,10 m se tiene una capa vegetal, los siguientes 0,30 m aparece la capa orgánica, compuesta por la descomposición de las raíces de la capa vegetal, los siguientes 0,40 m corresponden a una capa de ceniza volcánica, y los últimos 1,50 m al suelo residual (Fig. 1). De este último horizonte, se extrajeron las muestras para la presente investigación. Fueron recolectadas varias muestras alteradas e inalteradas del suelo con el fin de caracterizarlo química, física, mineralógica y mecánicamente, tanto en estado natural como contaminado y poder analizar las variaciones ocurridas por el proceso de contaminación. Se recuperaron dos muestras inalteradas en recipientes cilíndricos de aproximadamente 0,28 m de diámetro y 0,38 m de altura, una para efectuar la caracterización del sitio en estado natural, y la otra muestra para someterla a un proceso de lixiviación de fluidos, originados a partir de residuos sólidos enmarcados entre la clasificación de desechos domésticos y urbanos.

4.1. Proceso de lixiviación

Este proceso se realizó para simular la contaminación del suelo en un relleno sanitario sin control (basurero), en el cual el suelo está en contacto con los residuos sólidos y sometido en el tiempo a un proceso de lixiviación producto de las aguas lluvias y los líquidos propios de la basura, los cuales son transportados a través de los residuos hasta llegar al suelo, generando así una contaminación en los estratos superiores de éste.

Inicialmente a la muestra inalterada se le modificó la altura para que quedara un espacio libre de 0,14 m. en donde se pudieran depositar los residuos orgánicos que harán las veces de contaminante de la muestra, los cuales se dejaron durante un mes para garantizar la lixiviación de los mismos. Transcurrido este tiempo, se procedió a realizar los ensayos de caracterización geotécnica del material y efectuar la respectiva comparación con la muestra natural.

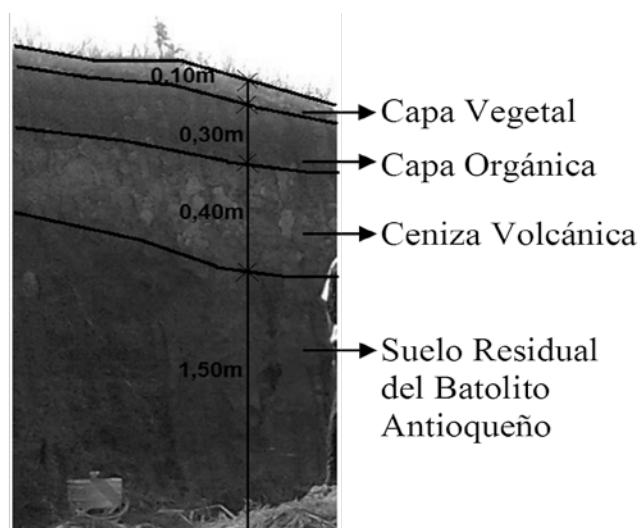


Figura 1. Perfil de meteorización del sitio de estudio
Fuente: Los autores.

La etapa de laboratorio consistió en la caracterización geotécnica de las muestras recuperadas en el sitio descrito. Se realizaron igual cantidad y tipo de ensayos a la muestra sin ningún tipo de exposición a contaminantes y a la muestra previamente contaminada garantizando la repetitividad de los mismos. La muestra que representa la condición "in situ" de la zona, es decir, la muestra sin ningún tipo de contaminantes, será llamada como "muestra natural". Y a la muestra que se sometió al proceso de lixiviación se le dará el nombre de "muestra contaminada".

Cabe aclarar que los ensayos de caracterización sobre la muestra contaminada, se realizaron bajo las mismas condiciones de humedad encontradas en la muestra natural, con el fin de eliminar la variable de humedad dentro de las comparaciones.

4.2. Ensayos de caracterización

Los ensayos de caracterización geotécnica realizados sobre las dos muestras se dividieron en 4 grupos; caracterización física, caracterización mineralógica y estructural, caracterización química y caracterización mecánica.

4.2.1. Caracterización física

La caracterización física consiste en obtener los índices físicos de los materiales, clasificación de suelos y otras propiedades de interés. Entre ellos se tiene: Contenido de humedad natural [4], Gravedad específica [5], Análisis granulométrico de suelos (con y sin agente defloculante) [6], Límites de consistencia (seco al aire y con humedad natural) [7] y clasificación de muestras según ensayo MCT rápido [8].

4.2.2. Caracterización mineralógica y estructural

Para determinar los minerales existentes en las muestras, el suelo se somete al ensayo de Difracción de rayos X. La estructura de los materiales se visualiza a través del

Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), que permite adicionalmente la identificación cualitativa y cuantitativa de los elementos químicos en los minerales.

4.2.3. Caracterización química

Esta caracterización se realizó con el fin de determinar la variación en las propiedades químicas de las muestras, inducidas por el proceso de contaminación al que fueron sometidas. Dentro de esta caracterización se determinó: pH en H₂O y en KCL, Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y Porcentaje de materia orgánica.

4.2.4. Caracterización mecánica

Los ensayos para la caracterización mecánica consistieron en: Ensayos de corte directo tipo CD (natural y saturado) [9], Ensayos de compresión simple en humedad natural [10], Ensayos duplo-edométricos [11], Determinación de la curva característica de retención de agua (Succión) [12] y Ensayo de desagregación (metodología descrita en [13]).

5. Resultados y Análisis

5.1. Caracterización física

En la Tabla 1 se presentan algunos parámetros físicos obtenidos para las dos muestras. Como se verá en los resultados de la difracción de rayos x, al no ocurrir una variación en la mineralogía del suelo al pasar del estado natural al estado contaminado, la gravedad específica de los sólidos no cambia, por ser ésta una propiedad cuyo valor está influenciado por la mineralogía del material. Con relación al índice de vacíos se puede observar que aumenta cuando se contamina el suelo, este cambio puede afectar el comportamiento mecánico e hidráulico del material, por contar con un suelo más poroso. La poca variación que se dio en los límites de plasticidad tanto para la muestra natural como contaminada, hace que la clasificación de estos materiales sea la misma, lo cual se presenta porque no hay cambios mineralógicos de un estado a otro.

Tabla 1.
Índices físicos de las muestras natural y contaminada.

Parámetro físico	Muestra natural	Muestra contaminada
Gravedad específica (Gs)	2,79	2,79
Relación de Vacíos (e)	1,54	1,69
Peso unitario [kN/m ³]	14,43	13,55
Peso unitario seco [kN/m ³]	11,02	10,42
Humedad Natural [%]	30,89	30,06
Porosidad (n) [%]	60,63	62,78
Grado de saturación (Sr) [%]	56,26	50,16
Límite Líquido seco al aire [%]	54	54
Límite Plástico seco al aire [%]	42	44
Índice de Plasticidad seco al aire [%]	12	10

Fuente: Los autores

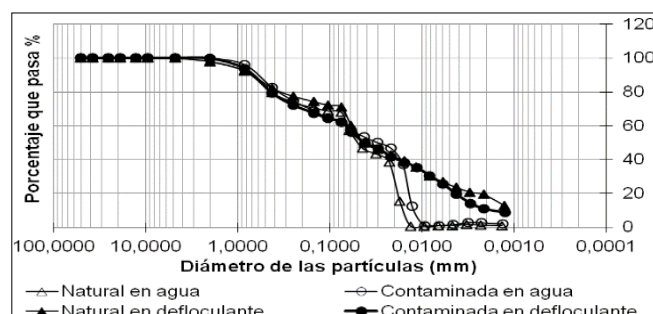


Figura 2. Curvas granulométricas en agua y en agente defloculante de las muestras natural y contaminada.

Fuente: Los autores.

Los ensayos de MCT realizados en los suelos, clasifican tanto la muestra natural como contaminada como No Lateríticas; la muestra natural se ubica en el grupo NS'/NA', donde el símbolo (/) indica que tiene mayor peso la primera clasificación (NS'), y la muestra contaminada se ubica en el grupo NG'. Estos grupos de clasificación se caracterizan por ser suelos de comportamiento no laterítico, suelos que presentan intemperización, pero no muy profunda, lo cual puede deberse a que los procesos erosivos locales juegan un papel importante, que no permite el desarrollo de perfiles maduros [14].

El cambio que provoca pasar de NS' (limo arenoso) a NG' (limo arcilloso) ocurre básicamente por un aumento en la contracción del material contaminado. Dicha contracción posiblemente se potencio porque al contaminar el suelo se incrementan los iones existentes en él; esto genera una mayor atracción entre las partículas de arcilla, ocasionando un aumento en la agregación. El incremento en la contracción es un aspecto que debe tratarse con cuidado en la geotecnia porque la contracción puede generar grietas en el suelo que desencadenen en posteriores problemas de estabilidad.

El análisis granulométrico se efectuó combinado; cada muestra se evaluó primero con agua y luego con agente defloculante (hexametáfosfato de sodio), esto para evaluar si existe agregación en los granos, y comparar que efecto produce la contaminación en las muestras.

Analizando separadamente las muestras en estado natural y contaminado (Fig. 2), se puede observar diferencias en la franja de los finos (<0,074mm) cuando se usa defloculante, lo cual refleja la existencia de agregaciones, que son inestables en presencia de aguas residuales, ya que neutralizan las cargas en los minerales [14]. Ya observando las curvas en estado natural y contaminado, entre sí, se puede ver que la muestra contaminada presenta levemente partículas de menor tamaño que la muestra natural, tal como lo indicó la clasificación MCT.

5.2. Caracterización mineralógica y estructural

5.2.1. Difracción de Rayos X

Comparando el difractograma resultado del ensayo de rayos X para la muestra contaminada y la muestra natural (Fig. 3), se puede observar que la cantidad relativa para cada mineral identificado, disminuye en el material contaminado

comparado con el material natural. Como no hay cambio mineralógico, sino cambio de la intensidad relativa de los picos, se considera que pudo generarse un lavado de minerales debido a los lixiviados, producto de la descomposición de los sólidos orgánicos o simplemente deberse al proceso de muestreo. Con relación a los minerales existentes en las muestras (P1: Caolinita, P2: Moscovita, P3: Cuarzo, P4: Moscovita, P5: Cuarzo), la presencia de caolinita en el suelo se explica como el producto de la meteorización de las plagioclasas y debido a que el pico de ésta, es relativamente bajo, se puede pensar en un suelo joven como se vio en la clasificación MCT donde el suelo clasificó como No Laterítico.

5.2.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En las Figs. 4a y 4b se observan las diferencias estructurales y mineralógicas entre la muestra natural y la contaminada, observadas en el Microscopio Electrónico de Barrido:

5.3. Caracterización química

En la Tabla 2, se muestran los resultados obtenidos de los análisis químicos realizados a la muestra natural y a la contaminada, en estos resultados se pueden ver datos representativos como el potencial de hidrogeniones (pH), el contenido de materia orgánica (M.O.) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC):

Para la muestra natural se obtuvo un $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 5,30$, lo que corresponde a un suelo ácido, en la muestra contaminada se tiene una disminución del pH de 5,30 a 4,60, lo que representa un aumento de H^+ libres; éste incremento en la acidez se da principalmente por el aumento de materia orgánica. El ΔpH ($\text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) negativo indica que hay predominancia de arcillo minerales en las dos muestras, concordando con la clasificación de No-Laterítico. Como era de esperarse, hubo un aumento en el porcentaje de materia orgánica en la muestra contaminada, debido a la descomposición de los residuos orgánicos usados para la lixiviación sobre la muestra, por tal motivo se genera también un incremento en la CIC. Un aumento en la CIC genera un suelo con mayor capacidad para retener y liberar iones positivos (Suelo más inestable químicamente).

5.4. Caracterización mecánica

En el comportamiento mecánico del suelo se generaron algunos cambios significativos debido al proceso de contaminación al que se sometió la muestra, además se identifican algunas variaciones de comportamiento entre las muestras saturadas y no saturadas.

5.4.1 Corte directo

En la Tabla 3 se muestran algunos de los resultados más importantes obtenidos de todos los ensayos de corte directo realizados a las muestras natural y contaminada:

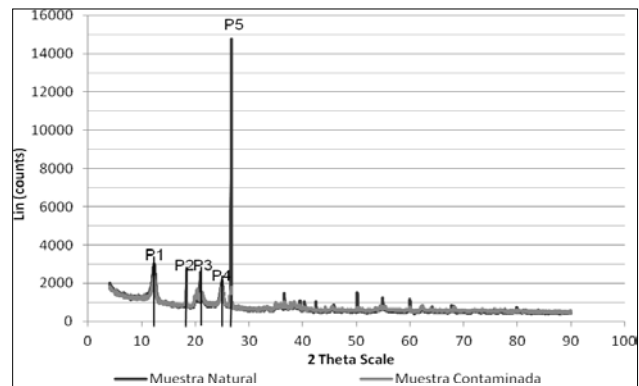
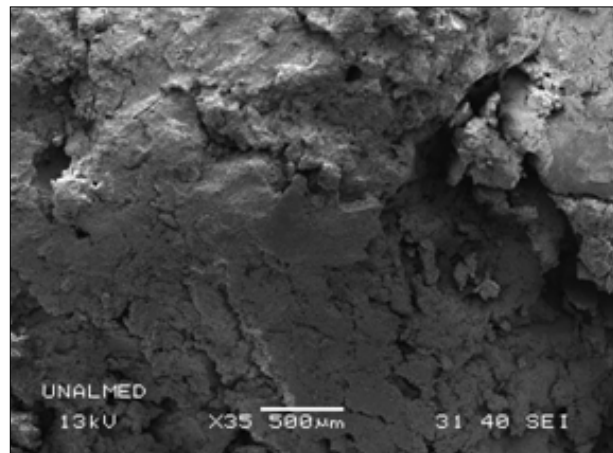
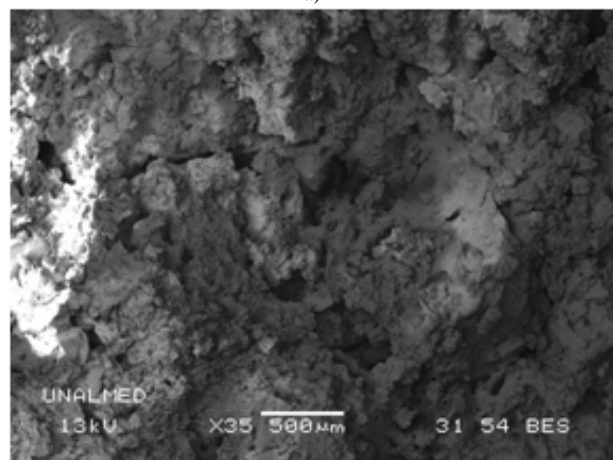


Figura 3. Difractogramas de las muestras natural y contaminada.

Fuente: Los autores.



a)



b)

Figura 4. Imágenes comparativas de los (SEM). a) Suelo natural, b) Suelo contaminado.

Fuente: Los autores.

Tabla 2.
Composición Química de las muestras analizadas

Muestra	pH H ₂ O	pH KCL	Δ pH	CIC pH7
Natural	5,3	3,9	-1,4	7,83
Contaminada	4,6	3,9	-0,7	10,05

Fuente: Los autores

Tabla 3.

Parámetros de resistencia de las muestras estudiadas.

Parámetro	Natural sin saturar	Natural saturada	Contaminada sin saturar	Contaminada saturada
Humedad inicial [%]	31,04	30,74	30,40	31,36
Relación de vacíos inicial	1,51	1,56	1,72	1,66
Peso unitario Húmedo [kN/m ³]	14,57	14,30	13,23	13,87
Peso unitario Seco [kN/m ³]	11,10	10,93	10,27	10,57
Cohesión (c) [kPa]	25	8	8	4
Fricción (ϕ) [°]	24	23	29	27

Fuente: Los autores

Como puede observarse, a pesar de aumentar el ángulo de fricción en la muestra contaminada debido a las agregaciones que se forman (registradas en la MEB), estas no son fuertes porque junto con el notable descenso de la cohesión, la resistencia de la muestra contaminada es mucho menor sin saturar que en la muestra en estado natural, mostrando el efecto negativo que tiene en la resistencia del suelo la contaminación. Además, se observa que hay una notable diferencia entre las resistencias de las muestras saturadas y las muestras sin saturar. En general, puede verse como el proceso de contaminación actúa en la resistencia del material como si éste estuviera sufriendo un proceso de saturación.

5.4.2. Compresión simple

Bajo las mismas condiciones de humedad en los dos suelos, se observó que para fallar la muestra contaminada, se necesitó solo del 92% del esfuerzo aplicado para fallar la muestra no contaminada, bajo el mismo nivel de deformación. Los resultados obtenidos muestran una disminución de la resistencia al esfuerzo compresivo, tal disminución se relaciona directamente con el proceso de lixiviación al que ha sido sometida la muestra contaminada. Para eliminar otra variable en la comparación, se normalizaron los valores de resistencia última (Q_u) con los respectivos valores de relación de vacíos. Esta normalización se realiza dividiendo la resistencia última entre la relación de vacíos (Q_u/e). Los resultados obtenidos muestran que para la muestra natural con una resistencia última de 141,53 kN/m³ y una relación de vacíos de 1,54, se obtuvo un valor de resistencia normalizada de 91,90 kN/m³, y para la muestra contaminada con una resistencia última de 130,24 kN/m³ y una relación de vacíos de 1,69, se obtuvo un valor de resistencia normalizada de 77,07 kN/m³. Esto confirma lo dicho anteriormente, que la resistencia disminuye por efecto de la contaminación a la que fue inducida la muestra. Dicha reducción de la resistencia también se puede analizar, relacionando la succión matricial en pF y el índice de vacíos; para la humedad de cada material. La succión en la muestra natural para una humedad de 32% es mayor, mientras que para la contaminada es menor para un valor de humedad de 31%, lo que indica que a mayor succión, mayor resistencia. La resistencia frente a la succión normalizada (pF/e), muestra mejores resultados para la muestra natural que para la contaminada, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.

Parámetros de resistencia y succión de las muestras analizadas.

Muestra	Q_u [kN/m ³]	Relación de vacíos (e)	Succión [kPa]	pF	pF/e
Natural	141,53	1,54	150	3,18	2,07
Contaminada	130,24	1,69	40	2,61	1,54

Fuente: Los autores

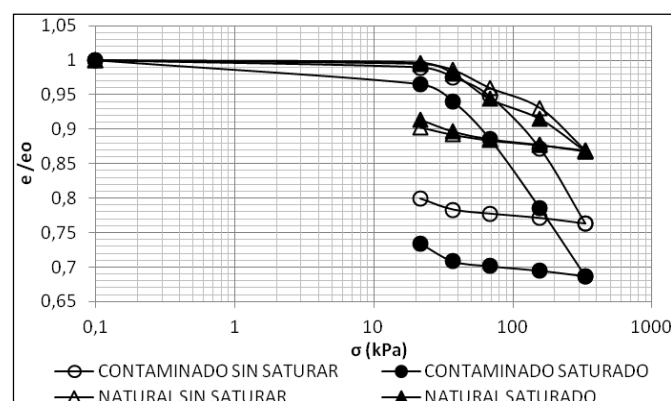


Figura 5. Curvas de consolidación normalizadas de las muestras natural y contaminada.

Fuente: Los autores

5.4.3. Ensayos duplo-edométricos

El fenómeno de colapso se produce en los suelos porosos no saturados, que a causa de situaciones externas, se ven afectados con cargas que generan asentamientos bruscos, efecto que al combinarse con aumentos de saturación, desestabilizan la estructura interna del suelo. Los suelos meta estables o colapsibles se caracterizan por que sus partículas están unidas por vínculos que al removerse generan deslizamientos entre las mismas ocupando los vacíos [15].

Al analizar las curvas de compresibilidad de las muestras natural y contaminada en los estados saturado y no saturado (Fig. 5); se observa que tanto en la muestra natural como en la contaminada hay mayores cambios de volumen en el estado saturado que en el estado natural. Sin embargo, en la muestra contaminada se aprecian mayores deformaciones, esto se debe a que la muestra contaminada deja susceptibles los puentes que conectan las partículas a perderse con la saturación, registrando así, deformaciones mayores [15].

Para medir el índice de colapso de las muestras estudiadas se hará uso de las siguientes ecuaciones [16]:

$$I = \frac{\Delta e_c}{\left[1 + \left(\frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}} \right) \times e_{o(medio)} \right]}$$

$$\Delta e_c = \left[\left(\frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}} \right) - \left(\frac{e_{sat}}{e_{o(sat)}} \right) \right] \times e_{o(medio)}$$

$$e_{o(medio)} = \frac{(e_{o(nat)} + e_{o(sat)})}{2}$$

En la Fig. 6, se presentan los resultados obtenidos del índice de colapso. Se observa que para la muestra contaminada se obtuvo un índice de colapso de 5,8% correspondiente a una carga crítica de 155,84 kPa, mientras que para la muestra natural se obtuvo un índice de colapso de 0,95% correspondiente a la misma carga crítica de 155,84 kPa. Comparando las dos curvas se ve claramente que para tensiones verticales iguales, el índice de colapso en la muestra contaminada es 6 veces mayor que el de la muestra natural, esto se debe, como fue mencionado a las reacciones químicas debidas a los lixiviados de los desechos orgánicos, que debilitan las conexiones entre las partículas de suelo, haciéndolo más vulnerable al colapso y pasando a clasificar el suelo de moderadamente problemático a problemático [17].

5.4.4. Determinación de la curva característica de retención de agua (succión)

En la Fig. 7, se muestran las curvas características de retención de agua de las muestras natural y contaminada. Se puede observar claramente una diferencia entre la succión matricial y la succión total de ambas muestras, siendo más marcada en la muestra contaminada, indicando un efecto químico más fuerte (Por aumento de sales en la muestra como se ve en la Tabla 2). El ingreso de fluidos contaminantes en

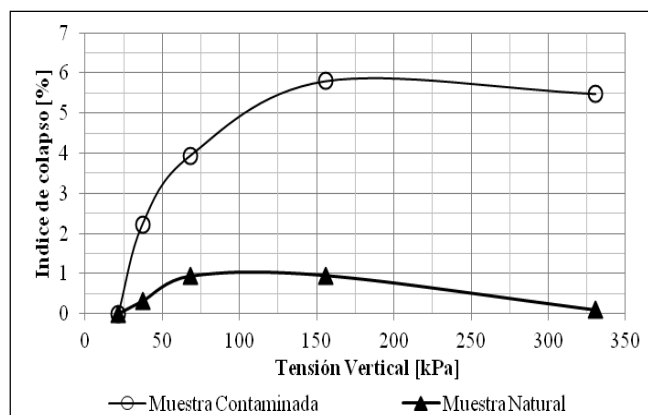


Figura 6. Índice de colapso para las muestras estudiadas.

Fuente: Los autores

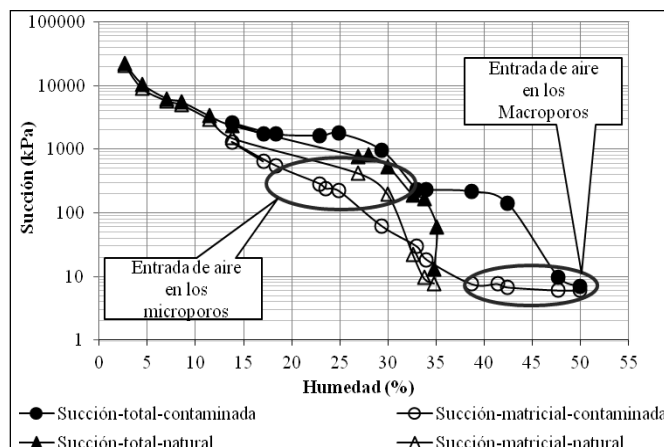


Figura 7. Curvas características de las muestras natural y contaminada.

Fuente: Los autores

el suelo cambia la composición química del fluido intersticial y se puede esperar una alteración de la succión osmótica [18].

Para la muestra natural se observa una ausencia de una región marcada de macroporos, claramente definida en la muestra contaminada, aspecto estructural que se confirma con los resultados obtenidos en el ensayo de microscopía electrónica de barrido. Adicionalmente, al estar la curva de succión matricial del suelo natural por encima en la región de los microporos, indica microporosidad menor en la muestra natural comparada con la muestra contaminada. Como la estructura de la muestra natural es más cerrada que la estructura de la muestra contaminada, las propiedades mecánicas se ven claramente afectadas.

6. Conclusiones

- Ante las variaciones presentadas en las propiedades y comportamiento del suelo por la acción de los lixiviados contaminantes, se pudo constatar que si los lixiviados generados por los depósitos de residuos sólidos no reciben un adecuado sistema de recolección y avanzan a los suelos de fundación, se pueden ver afectadas desfavorablemente algunas de sus propiedades geotécnicas como índice de vacíos, estructura, química, resistencia a la compresión, resistencia al corte, colapso y succión, convirtiéndose en un riesgo inminente para la población. Se resalta la necesidad de generar conciencia no solo en las autoridades ambientales sino en la comunidad en general en regular la disposición final de residuos sólidos en lugares que cumplan con todas las normativas para el manejo integral de los residuos y sus lixiviados. Lo cual evitará una contaminación al suelo de fundación con consecuentes problemas geotécnicos de consideración.
- Los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas de ésta investigación solo pueden ser aplicables a materiales con las mismas características químicas, mineralógicas, físicas y estructurales, ya que las alteraciones en el comportamiento dependerán no solo del tipo de residuos

utilizado sino también del tipo de material que va a ser contaminado.

- Es posible que el tiempo de exposición a los residuos sólidos al que fue sometido el material contaminado no hubiera sido suficiente para generar en la muestra cambios mineralógicos importantes que ocasionen mayores variaciones en las propiedades que los encontrados, por eso se recomienda aumentar dicho tiempo o trabajar directamente con un suelo de fundación de un botadero antiguo.

Agradecimientos

A todos aquellos que de una u otra forma contribuyeron con los resultados de sus ensayos para el desarrollo de esta investigación. A la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.

Bibliografía

- [1] ABNT, Resíduos sólidos-Clasificação, 1987.
- [2] Oliveira Dos Santos, A.M e Brito, S.N.A., Geologia de engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo. BR. 1998, 586 P.
- [3] Rodriguez, G., Gonzalez, H. & Zapata, G., Geología de la Plancha 147 Medellín Oriental. Medellín. 2005
- [4] Norma ASTM. D2216-10 Standard test methods for laboratory determination of water (Moisture) content of soil and rock by mass.
- [5] Norma ASTM. D854-10 Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer.
- [6] Norma ASTM. D422-63(2007) Standard test method for particle-size analysis of soils.
- [7] Norma ASTM. D4318-10 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.
- [8] Nogami, J. and Villibor, D., Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Brasil. Ed. Vilibor, São Paulo, SP, 1995.
- [9] Norma ASTM. D3080-04 Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.
- [10] Norma ASTM. D2166-06 Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil.
- [11] Norma ASTM. D2435-04 Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading.
- [12] Norma ASTM. D5298-10 Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper.
- [13] Santos, R.M.M., Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia. Tesis de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, GDM-044A/97, 1997, 120 P.
- [14] Valencia, Y., Influencia de la meteorización en las propiedades y comportamiento de dos perfiles de alteración originados de rocas metamórficas. Tesis Maestría en Ingeniería Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2005.
- [15] Zuluaga, M., Monsalve, J., Ocampo, S. y Valencia, Y., Efecto del depósito de residuos sólidos urbanos en las propiedades físico-químicas y mecánicas de un suelo tropical laterítico del Batolito Antioqueño (Colombia). Artículo aceptado para publicación en: COBRAMSEG2010, Brasil, 2010.
- [16] Jennings, J.-E. and Knight, K., A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to "collapse of grain structure", Regional conference for african on soil mechanics and foundation engineering, durban, 1975. pp. 99-105.
- [17] Valencia, Y., Yepes, J. y Echavarría, O., Evaluación por diferentes métodos del potencial de colapso de algunos suelos residuales en los

Valles de Aburrá y San Nicolás. Boletín de Ciencias de la Tierra (38), pp. 60-64, 2015. ISSN 0120 – 3630.

- [18] Da Silva, J., Estudo da colapsabilidade da argila porosa de Brasília pelo fluxo de contaminantes. Tesis de Mestrado Em Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2006.

A. Quintero-Ramírez, graduado de Ing. Civil de la Universidad Nacional de Colombia, en el año 2011. Ha trabajado en consultoría en geotecnia desde 2011 y actualmente es estudiante de Maestría en Ingeniería Geotécnica de la Universidad Nacional de Colombia. Dentro de las líneas de investigación se incluye los suelos tropicales, los suelos residuales y la contaminación de suelos.

ORCID: 0000-0001-8349-2853

Y. Valencia-González, graduada de Ing. Civil de la Universidad Nacional en el 2001, con MSc. en Ingeniería – Geotecnia en el 2005 de la Universidad Nacional de Colombia. En el 2009 recibió su título de Dra. en Geotecnia y posteriormente realizó un año de estudios posdoctorales en la Universidad de Brasilia en Brasil. Actualmente es profesora Asociada del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Sus líneas de investigación son: suelos tropicales, biotecnología, fundaciones y control de vibraciones.

ORCID: 0000-0002-5389-2212

L.A. Lara-Valencia, graduado de Ing. Civil de la Universidad Nacional en el 2005, con MSc. en Estructuras y Construcción Civil en el 2007 de la Universidad de Brasilia. En el 2011 recibió su título de Dr. en Estructuras y Construcción Civil en la Universidad de Brasilia en Brasil. Actualmente es profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Sus líneas de investigación son: Control de vibraciones, dinámica de estructuras y suelos tropicales.

ORCID: 0000-0002-2718-6234

Petrography, geochemistry and geochronology of metamorphic rocks outcropping in San Francisco Putumayo and the Palermo-San Luis road associated with the La Cocha - River Tellez and Aleluya complexes

Gilberto Zapata García ^a, Gabriel Rodríguez García ^a & María Isabel Arango Mejía ^a

^a Servicio Geológico Colombiano sede Medellín, Colombia. gzapata@sgc.gov.co, grodriguez@sgc.gov.co, Isabelara84@hotmail.com

Received: June 24th, 2016. Received in revised form: November 3rd, 2016. Accepted: December 20th, 2016.

Abstract

The La Cocha – Río Tellez Migmatitic Complex includes a set of metamorphic rocks, mainly migmatites, schists, gneisses and amphibolites, that lie in faulted contact with the Cuarzomonzonita de Sombrerillo Unit and cretaceous sedimentary rocks. The 163.6 ± 4.7 Ma U-Pb age in zircon is assumed as the age of metamorphism of the La Cocha-Río Tellez Migmatitic Complex, it was obtained in a quartz-feldspar schist that outcrops in the municipality of San Francisco-Putumayo; the ages of 194.4 ± 2.0 Ma, 218.8 Ma and 229.8 Ma correspond to inherited ages. The Aleluya Complex encompasses marbles, meta-sandstones, quartzites, and migmatites. U-Pb ages in zircon obtained for two granofels samples collected on the Palermo-San Luis (Huila) road, are separated into three populations of data with ages: 169.1 ± 2.7 Ma age of crystallization and inherited ages of 194.6 ± 3.2 Ma, 212.5, 218.6 and 235.5 Ma.

Keywords: La Cocha - Río Tellez Migmatitic Complex; Aleluya Complex Cordillera Central de Colombia.

Petrografía, geoquímica y geocronología de rocas metamórficas aflorantes en San Francisco Putumayo y la vía Palermo-San Luis asociadas a los complejos La Cocha – Río Tellez y Aleluya

Resumen

El Complejo Migmatítico La Cocha - Río Tellez comprende un conjunto de rocas metamórficas: migmatitas, esquistos, neises y anfibolitas, en contacto fallado con la Cuarzomonzonita de Sombrerillo y rocas sedimentarias cretácicas. Se asume como la edad del metamorfismo del Complejo Migmatítico La Cocha-Río Tellez la edad U-Pb en circones de 163.6 ± 4.7 Ma, obtenida en un esquisto cuarzo feldespático que aflora en el municipio de San Francisco-Putumayo, las edades de 194.4 ± 2.0 Ma, 218.8 Ma y 229.8 Ma, corresponden a edades heredadas. El Complejo Aleluya: mármoles, metareniscas, cuarcitas y migmatitas. Las edades U-Pb de dos muestras de granofels colectadas sobre la vía Palermo-San Luis (Huila), se separan en tres poblaciones de datos con edades: 169.1 ± 2.7 Ma edad de cristalización, edades heredadas de 194.6 ± 3.2 Ma, 212.5, 218.6 y 235.5 Ma. Los dos complejos están limitados por fallas asociadas a los sistemas de Chusma y Algeciras, zona de convergencia de los terrenos Chibcha y Tahamí.

Palabras clave: Complejo Migmatítico La Cocha - Río Tellez; Complejo Aleluya, Cordillera Central de Colombia.

1. Introducción

Trabajos adelantados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) durante la ejecución del proyecto

Magmatismo Jurásico del Valle Superior del Magdalena (VSM) y la cuenca del Putumayo, se fecharon rocas metamórficas asociadas a los complejos Aleluya y La Cocha-Río Tellez, localizados geográficamente sobre el borde

How to cite: Zapata García, G., Rodríguez García, G. & Arango Mejía, M.I., Petrografía, geoquímica y geocronología de rocas metamórficas aflorantes en San Francisco Putumayo y la vía Palermo-San Luis asociadas a los complejos La Cocha – Río Tellez y Aleluya. Boletín de Ciencias de la Tierra, (41), 48-65, 2017.

oriental de la Cordillera Central de Colombia. Los nuevos datos indican edades más jóvenes que las asignadas en los mapas geológicos y publicaciones anteriores, donde ambas unidades habían sido consideradas de edad precámbrica.

Este estudio presenta la interpretación de los datos geocronológicos de tres muestras datadas por el método U/Pb en circones y la descripción petrográfica y litogeoquímica de las rocas fechadas, así como la discusión de la información dentro del contexto geológico regional.

2. Marco geológico regional

El Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez fue descrito por [17] Ponce (1979) bajo el nombre de Complejo Migmatítico de Nariño, al referirse a los afloramientos expuestos en el flanco oeste de la Cordillera Centro Oriental, en el páramo de Los Alisales y en los ríos Téllez, San Francisco, Chingual, Sucio y San Pedro, este último cerca al valle de Sibundoy. El mismo [17] Ponce (1979) diferenció el Neis de La Cocha, expuesto en los alrededores de la laguna del mismo nombre. Posteriormente, [10] Murcia & Cepeda (1983) agruparon las dos unidades, y emplearon el término Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez, para designar las rocas metamórficas y granitos de anatexis que afloran en las proximidades de la laguna de La Cocha y el río Téllez, este complejo comprende un conjunto de rocas metamórficas, principalmente migmatitas, esquistos, neises y anfibolitas, junto con rocas de aspecto granitoide afectadas por blastesis, con estructuras migmatíticas [13] Núñez, 2003. Esta unidad aflora como ventanas o techos colgantes en el lado oriental del Valle de Sibundoy, está en contacto fallado con la Cuarzomonzonita de Sombrerillo de edad jurásica (Bajociano al Pleiensbaciano [17] Rodríguez *et al.*, 2015, [2] Bermúdez *et al.*, 2016) y con rocas sedimentarias cretácicas, se encuentra parcialmente cubierto por lavas y piroclastos de edad neógena-cuaternaria y depósitos de vertiente cuaternarios, Fig. 1.

El Complejo Aleluya agrupa mármoles, metareniscas, cuarcitas, migmatitas y rocas ígneas que intruyen las rocas metamórficas sin relación ordenada y difícil de separar cartográficamente [4] Ferreira *et al.* (2002). [5] Fuquen y Núñez (1989) y [4] Ferreira *et al.* (2002) consideraron la edad de estas rocas como proterozoica. La unidad se encuentra intruida, por la Cuarzomonzodiorita de Páez (Fig. 1.) que arrojó edades jurásicas entre 180 Ma y 193 Ma ([25] Zapata *et al.*, 2015).

Desde el punto de vista regional, los dos complejos se localizan en posición estructural similar, asociados a bloques de granitos jurásicos y rocas volcánicas de la Formación Saldaña, limitados por fallas regionales asociadas a sistemas relacionados con las fallas de Chusma y Algeciras. Se localizan en la zona de convergencia de los terrenos Chibcha y Tahamí, definidos por [24] Toussaint y Restrepo (1976), cuyo límite se ha considerado la Falla de Chusma.

El Terreno Chibcha, en el área de estudio, está conformado por un basamento de rocas metamórficas de alto grado, precámbricas del evento Nickeriense (Grupo Garzón, neises de Mancagua y Guapotón y Migmatitas de Las Minas), unidades sedimentarias paleozoicas (Formación El Hígado, Sedimentitas de La Jagua, Areniscas de La Batalla), granitos

Pérmicos (Granito de La Plata), mientras el Terreno Tahamí está constituido por rocas metamórficas de medio a bajo grado, de edades pérmicas y triásicas (Complejo Cajamarca).

2.1. Descripción geológica

En el sitio de muestreo, el Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez, está representado por rocas metamórficas faneríticas de tamaño fino a media con estructura esquistosa, constituidas por bandas de color blanco compuestas por cuarzo y plagioclasa, intercaladas con bandas de color gris oscuro, conformadas por hornblenda y biotita, Fig. 2A. La muestra 900798 presenta textura granolepidoblástica con bandas granoblástica (Fig. 3), se clasificada como esquistos de Qtz-Pl-Kfs-Bt con granate, Tabla 1. También se encuentran rocas de aspecto masivo con textura granoblástica, granofels de plagioclasa, feldespato, cuarzo y hornblenda, muestras 900797 (Fig. 2B) y 900799. El protolito de los granofels corresponde a rocas ígneas de composición granodiorita-cuarzomonzodiorita.

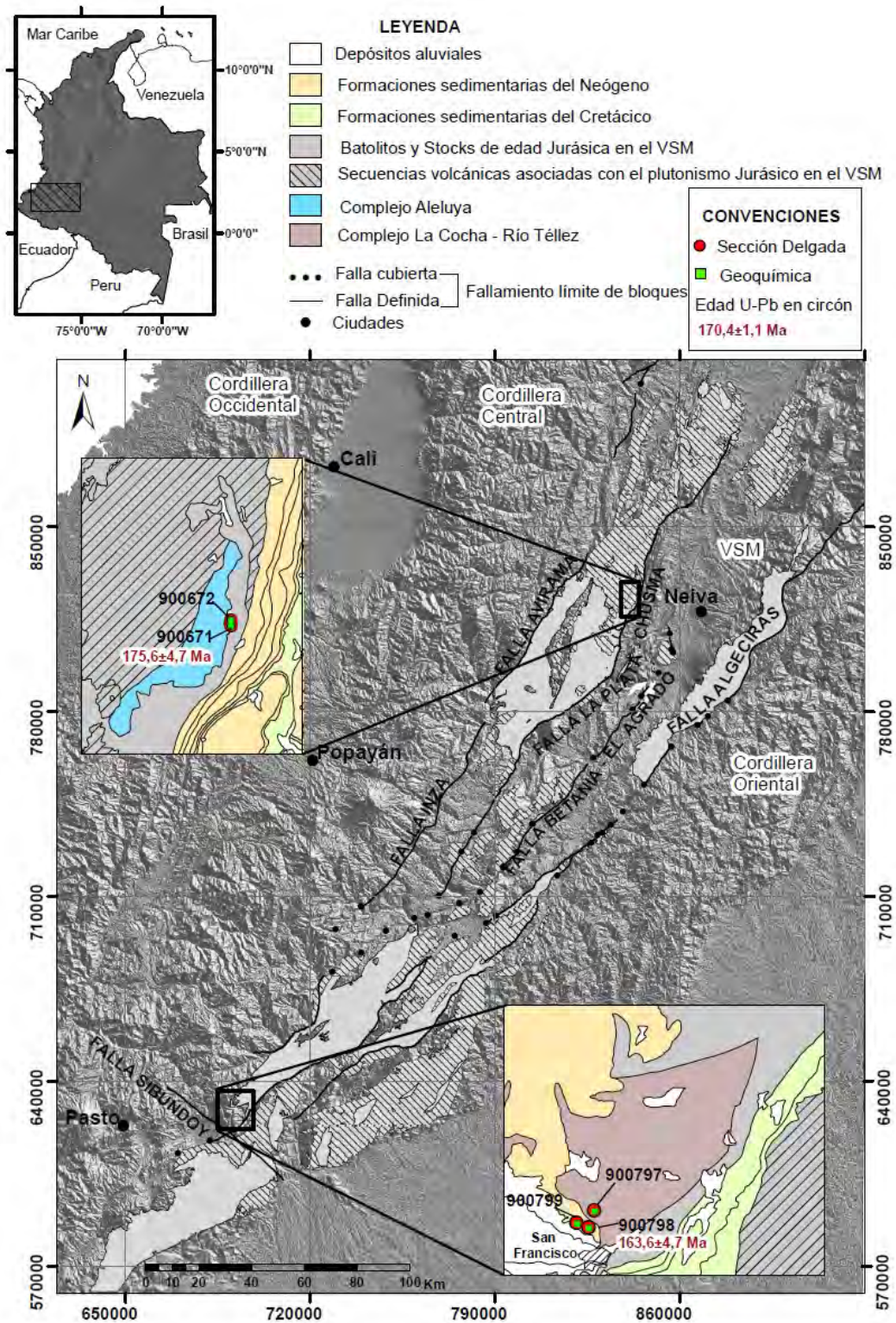
La plagioclasa del esquistos es oligoclasa (An₂₈) y en los granofels es oligoclasa hasta andesina (An₄₀), se presenta en cristales subidioblásticos a idioblásticos incoloros limpios a levemente empolvados por alteración a minerales de arcilla y sericita, inequigranular con tamaños entre 0.1 y 0.8 mm en el esquistos y ≤ 2.5 mm en el granofels, con maclas de albita, albita-Carlsbad y periclina, relieve n>balsamo. Se observan mirmequitas en algunos bordes de contacto con los feldespatos.

El feldespato potásico es microclina, en cristales subidioblásticos incoloros con maclas polisintéticas de microclina, relieve n<balsamo, color de interferencia gris del primer orden, en los bordes de contacto con plagioclasa se observan mirmequitas. El tamaño en los esquistos es ≤ 0.3 mm; en los granofels es inequigranular con tamaño ≤ 1.5 mm subidioblástico a idioblástico, maclas polisintéticas de microclina con inclusiones de cuarzo, plagioclasa y hornblenda, pertitas en forma de cordones y mirmequitas.

El cuarzo es inequigranoblástico xenoblástico, en el esquistos con tamaño entre 0.1 y 0.5 mm y en los granofels ≤ 2.5 mm, con bordes irregulares a poligonales, relieve bajo, color de interferencia gris del primer orden, extinción ondulada y forma mosaicos granoblásticos, Fig. 3.

La biotita, en láminas xenoblásticas a subidioblásticas de color pardo claro con pleocroísmo a pardo rojizo, tamaño ≤ 0.6 mm, en los granofels hasta de 3.5 mm, relieve moderado, exfoliación en una dirección, el máximo color de interferencia verde del segundo orden, extinción paralela. Parcialmente alterada a clorita y magnetita. Algunas láminas están levemente dobladas.

La hornblenda se encuentra en los granofels, es parda y verde con pleocroísmo a verde oliva, cristales xenoblásticos a idioblásticos con algunas maclas dobles, clivaje en dirección paralela al eje largo, relieve moderado, inclusiones de biotita, apatito y plagioclasa, color de interferencia azul del segundo orden. Ángulo de extinción 14°. Simplectitas de biotita. En los bordes presenta alteración a epidota con birrefringencia más alta.



B

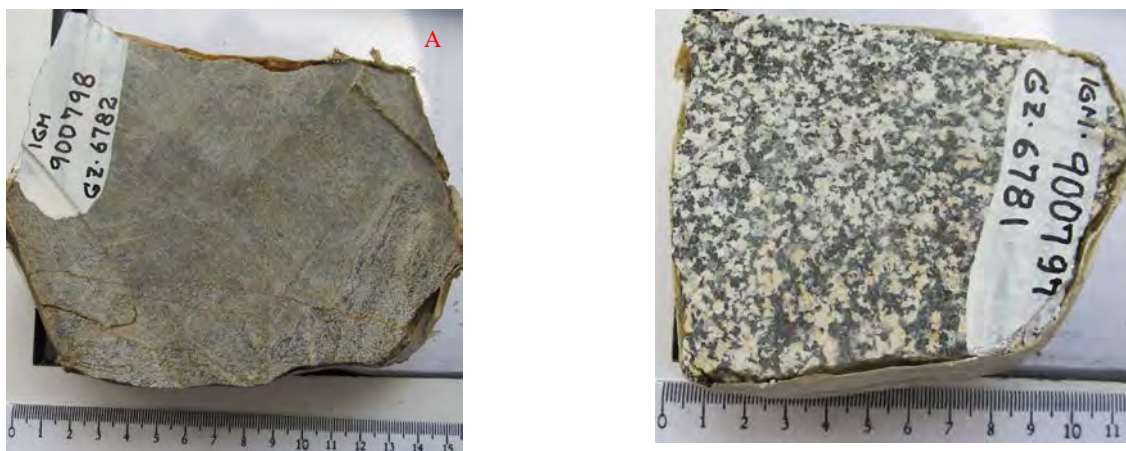


Figura 2. Aspecto macroscópico de las muestras 900798 (esquisto) y 900797 (granofels).

Fuente: Los autores

Tabla 1.

Análisis modal de las muestras el Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez y del Complejo Aleluya.

IGM	N	W	Qtz	Pl	Kfs	Hbl	Bt	Grt	Ms	Op	Ttn	Ap	Zrn	Clasificación Petrográfica
900797	623608	689117	12.99	31.17	9.09	34.52	1				2.6	TR		Granofels de Pl-Qtz-Kfs, Hbl
900798	622790	688841	33.4	31.17	23.9		8.7	2.59	0.4	TR			TR	Esquisto de Qtz-Pl-Kfs, Bt con Grt.
900799	623014	688274	13.92	50	7.59	8.23	18.35					TR	TR	Granofels de Pl-Qtz-Hbl
*900671	823861	843820	15.4	74.6	1.2	7.7	TR			0.5	0.6	0.1	TR	Granofels de Pl-Qtz-Hbl
*900672	824348	843798	38.4	16.7	32.5		12.4			TR		TR	TR	Granofels de Qtz-Kfs-Pl-Bt

* Muestras del Complejo Aleluya.

Fuente: Los autores

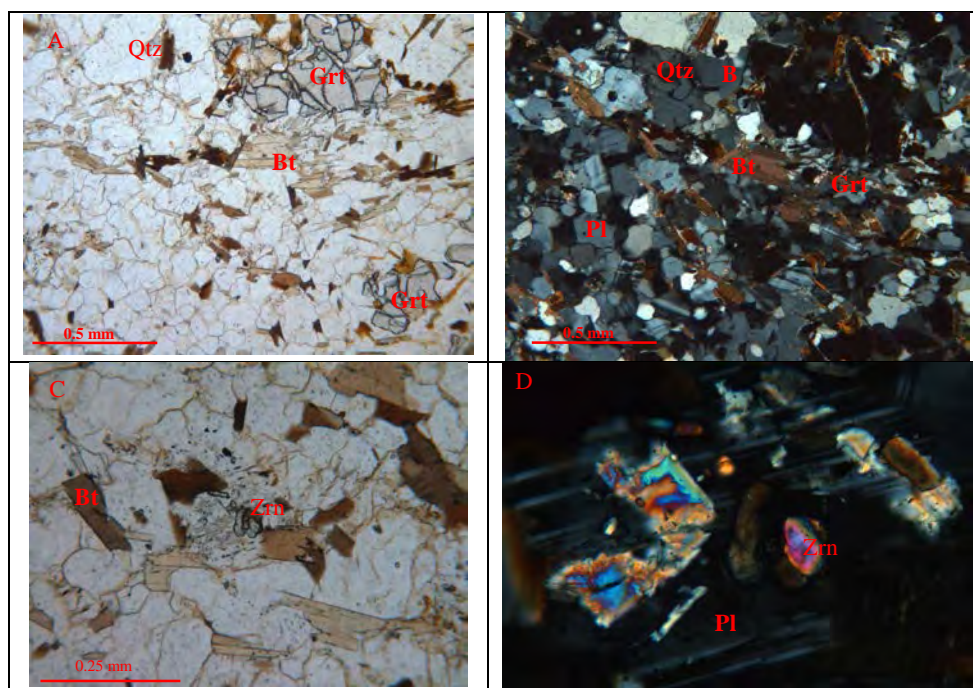


Figura 3. GZ-6782 (900798). Esquisto de Qtz-Pl-Kfs-Bt con granate. Escala gráfica, aumento 4x. A y C) Nícoles paralelos. B y D) Nícoles cruzados. Textura granolepidoblástica. Compuesta, por plagioclasa (Pl), cuarzo (Qtz), feldespato potásico y biotita (Bt), con granate (Grt). C) Nícoles paralelos objetivo 10X. D) Nícoles cruzados, objetivo 25X.

Fuente: Los autores

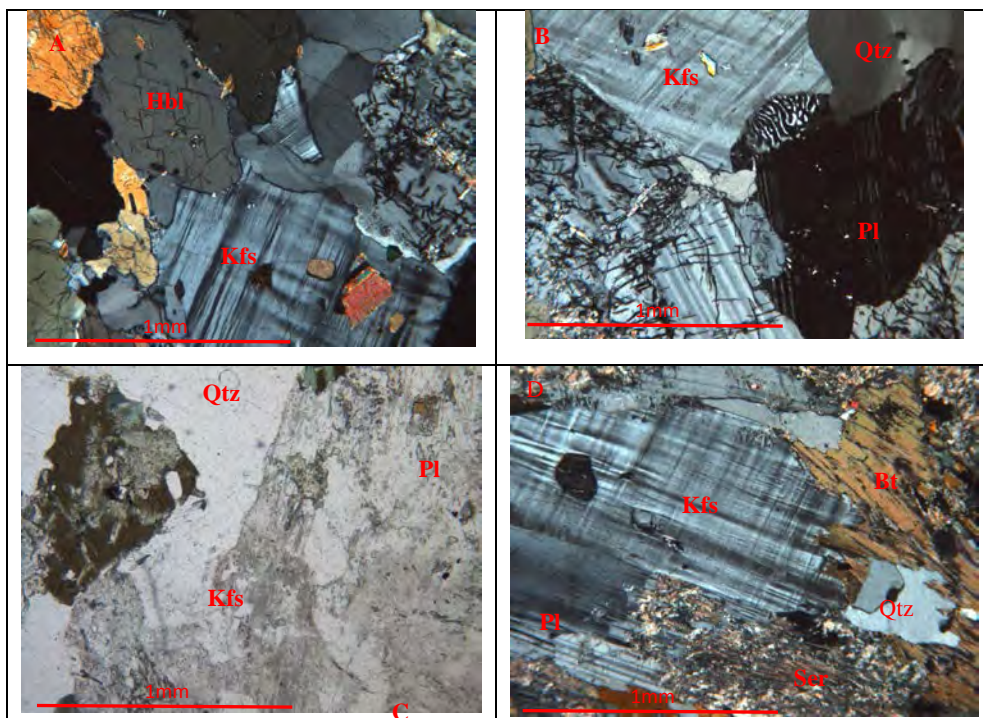


Figura 4. Aspecto microscópico de los granofels del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez. A y B) IGM 900797. C y D) IGM 900799. Textura granoblástica y mirmequítica. Compuesta, por plagioclasa (Pl), cuarzo (Qtz), feldespato potásico (Kfs), hornblenda (Hbl) y biotita (Bt). Fuente: Los autores

Como minerales accesorios encontramos clinopiroxeno, granate en cristales incoloros, xenoblásticos con relieve alto, tamaño ≤ 0.6 mm, Fig. 3A y Fig. 3B. Circón, microcristales subidioblásticos con relieve alto y birrefringencia del tercer orden, Fig. 3C y Fig. 3D; apatito, epidota. Opacos en cristales subidioblásticos diseminados. Se observan trazas de moscovita, incolora subidioblástica, con relieve moderado, color de interferencia verde del segundo orden y extinción paralela.

Las muestras de migmatitas del Complejo Aleluya se colectaron sobre la vía Palermo-San Luis, muestras GR-6596 y GR-6597, cerca al contacto con la Cuarzomonzodiorita de Páez. Macroscópicamente la roca GR-6596 (IGM 900671) es de color crema moteada de verde, fanerítica de grano fino a medio, con textura granoblástica, constituida por feldespatos, cuarzo y hornblenda, sin orientación mineral, Fig. 5A; la muestra GR-6597 (IGM 900672) es de color blanco moteada de negro, con orientación de los minerales, estructura bandeada, fanerítica de grano fino a medio, con textura granolepidoblástica y está constituida por cuarzo, feldespatos y biotita, Fig. 5B.

El análisis petrográfico de las dos (2) rocas muestra que son cristaloblásticas con texturas granoblástica y grano lepidoblástica, están constituidas por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita y hornblenda como minerales principales; con titanita, opacos, circón y apatito como minerales accesorios, Tabla 1 y Fig. 6.

La plagioclasa es andesina en cristales xenoblásticos a subidioblásticos con contornos lobulados, inequigranoblásticos, en contactos triples poligonales con cuarzo y feldespato, con maclas mal desarrolladas según la ley de albita, en algunos

cristales las maclas acunadas, el relieve mayor al del bálsamo ($n > b$), con inclusiones a manera de gotas de cuarzo (cuarzo drop like) y biotita. Siguiendo el método de Michel-Levy en macla de albita y albita-carlsbad se obtuvo un An_{33} , levemente empolvado por alteración a arcilla y sericita, tiene inclusiones de hornblenda, cuarzo y circón, Fig. 6.

El cuarzo se encuentra en cristales xenoblásticos inequigranoblásticos de formas lobuladas a subredondeadas, algunos en contactos triples poligonales, también como gotas incluidas en plagioclasa, limpio con extinción plana a levemente ondulada, contiene inclusiones de polvo a manera de líneas.

El feldespato alcalino corresponde a microclina, en cristales xenoblásticos inequigranulares incoloros, limpios, algunos sin maclas o con maclas mal desarrolladas de microclina, pueden o no tener desmezclas peritéticas en filoncillos, se presentan entre la red de cristales de cuarzo y plagioclasa, con relieve menor al del bálsamo ($n < b$).

La hornblenda solo se encontró en la muestra GR-6596 (IGM-900671), en cristales xenoblásticos intergranulares con crecimiento blástico en atolón, generalmente de menor tamaño que la plagioclasa y el cuarzo, de color verde con un pleocroísmo X: amarillo pálido, Y: verde, Z: verde oliva, el ángulo de extinción es de 17° , algunos cristales poiquiloblásticos con inclusiones subredondeadas de cuarzo y plagioclasa, color de birrefringencia amarillo del primer orden, Fig. 6^a.

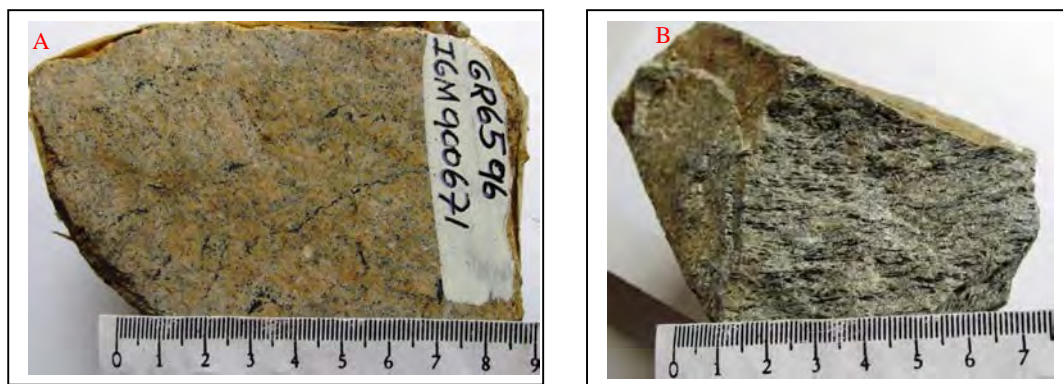


Figura 5. A) Aspecto macroscópico de las muestras GR-6596 (IGM 900671). B) GR-6597 (IGM 900672).
Fuente: Los autores

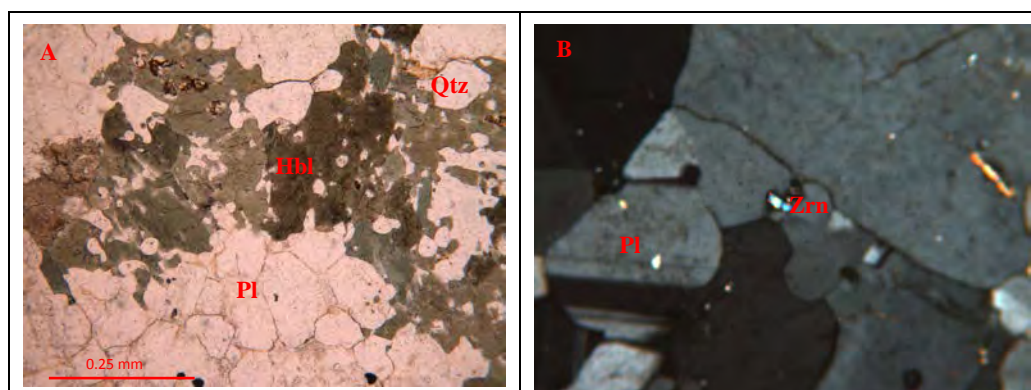


Figura 6. A) Aspecto microscópico de la muestra GR-6596 (IGM-900671). A) Nícoles paralelos. Granofels de Pl-Qtz y Hbl. Escala gráfica, objetivo 4x. Cristales xenoblásticos de plagioclasa (Pl), cuarzo (Qtz) y hornblenda (Hbl). B) Nícoles cruzados, objetivo 10x cristal de circón (Zrn), tamaño 34 μ m.
Fuente: Los autores

En la muestra GR-6597 (IGM-900672), la biotita ocurre en láminas orientadas idioblásticas a subidioblásticas, pueden formar bandas delgadas intercaladas con las bandas de feldespato-cuarzo, de color pardo con un pleocroísmo X. amarillo pálido Y=Z: pardo, extinción en arce moteado, presentan inclusiones de circón con halo pleocroico, así como opacos en los bordes de contacto entre cristales y apatitos finos, Fig. 7.

Entre los minerales accesorio se destacan los opacos que son de tamaño menor a 0.15 mm, diseminados en la roca, intergranulares y xenomórficos, algunos con inclusiones de apatitos y en los bordes con titanita. La titanita se encuentra en cristales finos xenomórficos con relieve alto, el color de interferencia es rosado del tercer orden. También se encuentra apatito junto a los opacos e incluido en biotita, en cristales incoloros, idiomórficos a subidiomórficos de relieve alto; el circón en microcristales finos xenomórficos, incluidos en la biotita, de formas subredondeadas a ovaladas, Fig. 6B y Fig. 7B).

3. Metodología analítica

En esta investigación se realizaron actividades de compilación de información, control de campo, muestreo para geoquímica y geocronología, elaboración de secciones delgadas y análisis petrográfico de muestras recolectadas y de muestras de proyectos anteriores que reposan en los laboratorios del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Los análisis químicos se hicieron en el laboratorio del Servicio Geológico Colombiano sede Bogotá. Para los óxidos mayores se utilizó el método de fluorescencia de rayos X, incluyendo los elementos trazas V, Mo, Nb, Ta, W, Zr y Hf y para el resto de elementos traza y tierras raras se utilizó el equipo de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Para la interpretación de los óxidos mayores se hizo el recalcu teniendo en cuenta los valores de LOI (perdidas por ignición).

La separación de minerales densos se realizó en el laboratorio químico del Servicio Geológico Colombiano sede

Medellín, utilizando separación hidrodinámica, magnética y por último el montaje de los circones.

Los análisis geocronológicos se realizaron en el laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) en el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Juriquilla con la siguiente metodología: las concentraciones de U y Th fueron calculadas empleando un círculo estándar externo de acuerdo a [14] Paton *et al.* (2010). Las incertidumbres de sigma 2 propagadas se lograron según [14] Paton *et al.* (2010). Las proporciones $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, edades y errores se calcularon según [16] Petrus y Kamber (2012). Los puntos analizados son de 23 micrómetros, utilizando un protocolo de análisis modificado de [21] Solari *et al.* (2010). Los datos fueron medidos empleando un *Thermo X series QICPMS* acoplado a un *Resonetics*, estación de trabajo láser excimer Resolución M050. Se realizó un análisis estadístico con el fin de mejorar el rango de confiabilidad de la edad proporcionada por el laboratorio, teniendo en cuenta la relación $[(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) - (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) / ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}]$, eliminando los datos de circones con valores discordantes que estuvieran, en general, por encima de 15%. Los gráficos de concordia e histogramas se elaboraron en el software de Isoplot/Ex vers. 4.15 [8] Ludwig, 2008.

Dataciones complementarias U-Pb se realizaron en el laboratorio de Laser Ablación del Servicio Geológico Colombiano que cuenta con un equipo de ablación laser Photon Machines, láser exímero de 193 μm y Espectrómetro ICP-Masas Element 2, se utilizaron como patrones de referencia Plesovice, 91500 y M. Dromedry los puntos analizados o de ablación son de 20 micrones y la reducción de datos se realizó utilizando el programa Iolite IGROpro y un espectrómetro de masas, se utilizó como tiempos de integración para la línea base 0 s - 38 s y para las muestras y patrones de referencia 32.5 s - 8 s, tiempos que concuerdan con el tiempo de corrida de los análisis. Los Isótopos utilizados para la integración manual ^{238}U , Pb^{206} y Pb^{204} . Los resultados finales y anexos, corresponden a la media de los datos obtenidos luego de aplicar una discriminación de datos a 2 desviaciones estándar. El procesamiento se lleva a cabo con las rutinas de Isoplot V3.5 y la corrección por plomo común se realiza de acuerdo con el modelo de evolución

según [22] Stacey & Krammers (1975). Se eliminaron los datos de circones con valores discordantes que estuvieran por encima de 10% o 15% según la muestra.

4. Geoquímica

Los análisis químicos de las muestras GZ-6782 de esquisto de Qtz, Kfs, Bt con Grt, GZ-6781 y GZ-6783 de granofels del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez, se realizó en el laboratorio del Servicio Geológico Colombiano sede Bogotá. Para los óxidos mayores se utilizó el método de fluorescencia de rayos X, incluyendo los elementos trazas V, Mo, Nb, Ta, W, Zr y Hf y para el resto de elementos traza y tierras raras se utilizó el equipo de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Para la interpretación de los óxidos mayores se recalcularon los valores teniendo en cuenta perdidas por ignición (LOI) de 1.05%.

4.1. Óxidos mayores

Los resultados del laboratorio para óxidos mayores, elementos traza y tierras raras se presentan en la Tabla 2. El mayor valor de SiO_2 se presenta en el esquisto (70.55%), el contenido de álcalis 6.8%) y $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$, bajo TiO_2 (<0,5 %). Los granofels con protolito ígneo tienen valores similares de SiO_2 cercanos a 55%, contenido de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ entre 4.5 y 5.8, $\text{TiO}_2 < 1$.

El diagrama ACF de [7] Hutchison, 1974 modificado de Winkler, 1967 es apropiado para discriminar los distintos tipos de protolitos litológicos de rocas metamórficas, los óxidos Al_2O_3 , CaO y $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ están expresados en proporciones molares. En este diagrama la muestra GZ-6782 se ubica en el campo composicional de las rocas pelíticas por el alto contenido de Al_2O_3 , recalculado para el diagrama a 68.7%, $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ de 5.28% y CaO de 0.46%, Fig. 8; concuerda con la descripción petrográfica en la cual se consideró el protolito como sedimentario con granate y moscovita.

La relación álcalis/ SiO_2 de las muestras de granofels está indicando que el protolito corresponde a rocas intermedias de composición diorítica, subalcalinas.

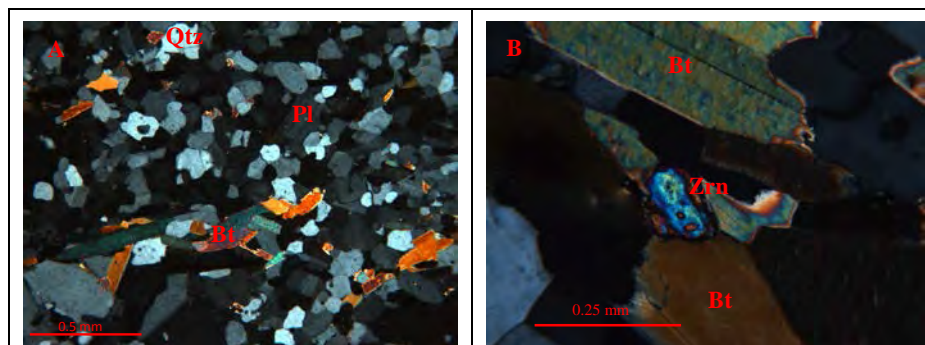


Figura 7. Aspecto microscópico de la muestra IGM-900672 (GR-6597). A) Nícoles cruzados. Granofels de Pl-Qtz y Hbl. Escala gráfica, objetivo 4x. Cristales xenoblásticos de plagioclasa (Pl), cuarzo (Qtz) y biotita (Bt). B) Nícoles cruzados, objetivo 25x cristal de circon (Zrn), tamaño 167 μm .

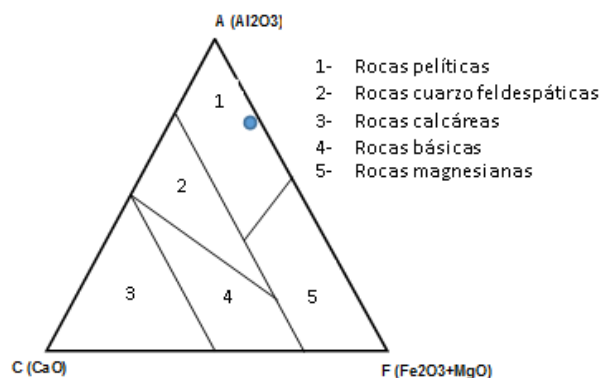
Fuente: Los autores

Tabla 2.

Contenidos de óxidos mayores de las muestras del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez.

IGM	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	FeO	LOI
900797	55.17	0.78	13.90	6.59	4.71	1.23	6.63	2.09	2.44	0.42	3.92	2.11
900798	69.44	0.37	12.47	4.57	0.65	1.58	0.44	2.38	4.41	0.07	2.56	1.05
900799	55.64	0.95	15.43	6.79	3.11	1.10	4.63	2.77	3.09	0.25	4.48	1.76

Fuente: Los autores

Figura 8. Diagrama ACF (Al₂O₃, CaO y Fe₂O₃+MgO) Wincler (1967), modificado por Hutchison (1974) para la muestra GZ-6782.

Fuente: Los autores

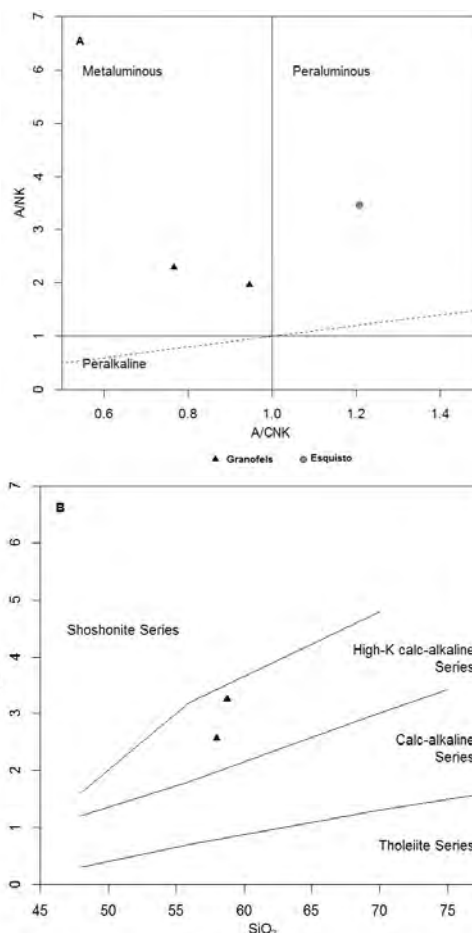
En el diagrama de alcalinidad-aluminosidad de [20] Shand (1943), la muestra GZ-6782 presenta un índice de saturación en alúmina [$Al_2O_3 > (CaO + Na_2O + K_2O)$], con $A/CNK > 1$, campo de rocas peraluminosas, Fig. 9A; la roca contiene minerales ricos en aluminio como plagioclasa, feldespato, biotita, moscovita y granate. Por el contrario las muestras GZ-6781 y GZ-6783 de granofels, se ubican en el campo de las rocas metaluminosas con $A/CNK < 1$.

En el diagrama de [15] Peccerillo & Taylor, 1971 (K_2O/SiO_2) las rocas granofélsicas del del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez se ubican en el campo de las series calcoalcalinas altas en K, Fig. 9B.

4.2. Elementos traza y tierras raras

Los resultados de los análisis de elementos traza y tierras raras para las tres rocas metamórficas del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez se presentan en la Tabla 3.

En el diagrama de elementos de las tierras raras (REE) normalizado al condrito según [11] Nakamura (1974), las muestras de granofels presentan concentraciones de tierras raras con valores inferiores a 100 veces el valor del condrito, con enriquecimiento en tierras raras livianas (LREE) con un patrón homogéneo que se va empobreciendo progresivamente hacia las tierras raras pesadas (HREE) hasta valores cercanos a 10 veces el valor del condrito con una pendiente negativa suave que se aplanan en las tierras raras pesadas, Fig. 10A.

Figura 9. Rocas del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez. A) Diagrama de alcalinidad-aluminosidad (Shand, 1943. B) Diagrama K_2O Vs SiO_2 (Peccerillo & Taylor, 1971).

Fuente: Los autores

En el diagrama NMORB [23] (Sun & McDonough, 1989) para los granofels en la Fig. 10B se observan líneas con varios picos positivos y negativos que revelan empobrecimiento de los elementos inmóviles Nb, La, Ce, P y Ti y anomalías positivas para Ba, K, Pb y menos marcadas para Nd y Sm. Se destaca la muestra de granofels IGM 900799 (GZ-6783) por los mayores contenidos de elementos traza, pero con valores cercanos en la mayoría de los elementos, con respecto a la otra muestra, difiere en una anomalía negativa más pronunciada para P y una positiva para Y.

Las relaciones para rocas metamórficas del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez de LaN/YbN , LaN/SmN ,

Tabla 3.

Elementos traza y tierras raras de las muestras del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez.

Elementos traza y tierras raras de las muestras del Complejo Magmático La Cocha - Río Tenez.														
IGM	Li	Be	Sc	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	
900797	7.74	2.92	44.30	158.00	29.90	1295.82	28.83	40.53	15.37	83.69	17.87	47.94	484.83	
900798	11.13	1.89	13.32	15.80	16.82	1496.07	9.81	2.23	14.00	191.11	18.16	150.76	166.59	
900799	16.58	2.99	29.80	137.30	61.46	955.42	27.53	19.82	51.62	104.36	20.99	120.26	408.15	
IGM	Y	Cd	In	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	
900797	16.73	0.18	0.05	0.63	1290.32	32.32	61.87	7.59	28.03	6.36	2.51	5.94	0.83	
900798	26.76	0.37	0.03	1.19	1770.85	39.86	85.45	11.83	44.24	10.57	2.98	8.82	1.20	
900799	79.94	0.16	0.06	2.26	1137.43	34.88	72.45	9.54	38.26	8.90	2.59	8.00	1.23	
IGM	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Tl	Pb	Th	U	Nb	Hf	W	Zr
900797	4.03	0.74	2.15	0.28	1.91	0.31	0.21	8.84	5.51	1.12	4.60	< 8	14.00	109.60
900798	5.73	1.13	3.72	0.55	3.84	0.61	1.10	176.22	9.15	1.17	15.80	14.20	31.70	443.10
900799	6.65	1.33	4.03	0.54	3.48	0.51	0.53	13.15	6.14	1.42	9.30	8.40	25.70	327.70

Fuente: Los autores

SmN/YbN, CeN/YbN, CeN/SmN, EuN/YbN y Eu/Eu* con valores normalizados se presentan en la Tabla 4, en ella se observa la afinidad de las dos muestras de granofels y el contraste de los valores con la muestra de esquisto (900797), confirmando la distinta procedencia. Las dos muestras de granofels tienen una relación (Eu/Eu*<1) y debido a su protolito ígneo, pueden asociarse con un origen de afinidad continental, procedentes de la fusión parcial de la corteza donde los residuos de estos fundidos fueron ricos en plagioclasa, reteniendo el Eu en la corteza inferior y generando un patrón empobrecido en Eu en la corteza superior. Las relaciones Eu/Eu*<1 y LaN/SmN>2 evidencian un enriquecimiento de tierras raras ligeras con relación a las HREE en las dos muestras de granofels, Tabla 4.

Las relaciones para rocas metamórficas del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez de LaN/YbN, LaN/SmN, SmN/YbN, CeN/YbN, CeN/SmN, EuN/YbN y Eu/Eu* con valores normalizados se presentan en la Tabla 4, en ella se observa la afinidad de las dos muestras de granofels y el contraste de los valores con la muestra de esquisto (900797), confirmando la distinta procedencia. Las dos muestras de granofels tienen una relación (Eu/Eu*<1) y debido a su protolito ígneo, pueden asociarse con un origen de afinidad continental, procedentes de la fusión parcial de la corteza donde los residuos de estos fundidos fueron ricos en plagioclasa, reteniendo el Eu en la corteza inferior y generando un patrón empobrecido en Eu en la corteza superior. Las relaciones Eu/Eu*<1 y LaN/SmN>2 evidencian un enriquecimiento de tierras raras ligeras con relación a las HREE en las dos muestras de granofels, Tabla 4.

A las muestras GZ-6782 y GR-6597 se les realizó análisis de ICP-MS que permitió determinar la abundancia de elementos traza en cada uno de los circones de las dos muestras, Tabla 5, los valores de REE se normalizaron a condrito [23] (McDonough & Sun, 1995) y se calcularon las relaciones Pm* y Tm* para cada uno de ellos. En la Fig. 11 se observa un comportamiento homogéneo con una química similar para la mayoría de los circones, sugiriendo que provienen de una misma fuente.

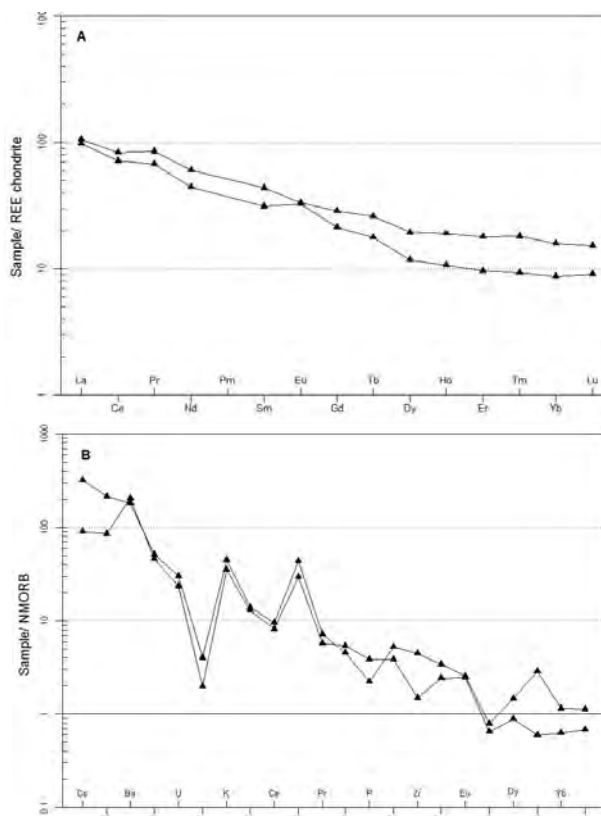


Figura 10. A) Diagrama de REE normalizado respecto al condrito (Nakamura, 1974). B) Diagrama normalizado a NMORB (Sun & McDonough, 1989).

Fuente: Los autores

Dos de los circones están enriquecidos con valores mayores a 100 veces el condrito en tierras raras livianas (LREE), uno para la muestra GR-6597, circón (083 en la Tabla 5) ígneo con edad de 198 Ma, y otro para la muestra GZ-6782 (218 en la Tabla 5), ígneo con edad de 196.8 Ma. Posiblemente estos dos circones cristalizaron junto a otro mineral enriquecido en los elementos de las LREE como el apatito.

Los circones de ambas muestras tienen un patrón con pendientes positivas hacia las HREE, se observa en todos los

Tabla 4.

Relaciones normalizadas para La, Ce, Sm, Eu e Yb en rocas del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez (Nakamura, 1974 norm. factors)

IGM	LaN/YbN	LaN/SmN	SmN/YbN	CeN/YbN	CeN/SmN	EuN/YbN	Eu/Eu*
*900797	11.28	3.13	3.61	8.24	2.28	3.75	1.26
900798	6.92	2.32	2.98	5.66	1.9	2.22	0.95
900799	6.68	2.41	2.77	5.29	1.91	2.13	0.94

*muestra de esquisto

Fuente: Los autores

Tabla 5.

Contenidos normalizados de elementos traza y tierras raras en circones en las muestras GZ-6782 y GR-6597.

GZ-6782	La	Ce	Pr	Nd	Pm*	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm*	Yb	Lu
Zircon-201	0.22	6.57	2.1	7.26	18	44.59	9.41	190	421.1	796.8	1435.9	2281.3	3313.8	4813.7	6418.7
Zircon-203	0.43	22.01	3.66	9.39	21.6	49.46	18.8	187	364	642.7	1166.7	1762.5	2431.1	3353.4	4434.96
Zircon-205	0.21	36.92	1.63	5.73	15.6	42.3	15.8	242	505.8	929.7	1641	2561.3	3493.1	4764	6243.9
Zircon-208	0.69	11.63	1.67	3.06	7.18	16.82	8.92	92.1	193.4	362.6	684.43	1100.6	1563.5	2221.1	3047.56
Zircon-209	0.33	18.27	3.19	12.7	32.9	85.14	35	345	626	1106	1906.6	2856.3	3919.6	5378.9	7085.37
Zircon-210		32.35	4.54	18	44.7	110.8	54.2	519	939.1	1626	2743.6	4106.3	5448.6	7229.8	9495.93
Zircon-211		90.86	1.53	8.4	24.2	69.59	16.7	357	782.6	1402	2441.4	3668.8	4935.5	6639.8	8426.83
Zircon-212		28.87	0.92	4.2	12.2	35.54	14.6	177	376.7	674.8	1230.8	1906.3	2591	3521.7	4569.11
Zircon-213		28.34	0.64	3.74	10.7	30.41	10.9	171	355.1	654.9	1172.2	1850	2536.2	3477	4560.98
Zircon-214		9.98	0.31	1.66	5.43	17.7	8.7	80.2	167	313.8	560.99	936.25	1326.3	1878.9	2585.37
Zircon-216		9.95	0.83	2.98	8.34	23.38	12.2	105	218.8	411	752.75	1220	1719.1	2422.4	3300.81
Zircon-217	0.04	8.71	0.2	1.23	3.78	11.69	5.74	61.5	152.6	265.5	500.37	805.63	1158.3	1665.2	2239.84
Zircon-218	146	259.4	143.3	164	192	223.7	41.2	644	1136	1939	3315	4950	6584.1	8757.8	11178.9
Zircon-219	0.97	24.47	2.06	4.46	12.9	37.3	19.4	167	337.4	586.6	1045.8	1616.3	2188.3	2962.7	3943.09
Zircon-220	0.02	10.28	0.15	1.75	5.33	16.22	6.86	78.2	163.7	298.4	562.64	924.38	1290.8	1802.5	2496.75
Zircon-221		13.88	1.05	4.53	12.1	32.5	18.5	167	315.8	576	1062.3	1670	2335.8	3267.1	4540.65
Zircon-222	2.78	15.5	5.06	9.19	20.2	44.39	15.5	182	366.5	642.7	1161.2	1810	2447.9	3310.6	4455.28
Zircon-223		32.33	0.89	4.31	12.2	34.39	12.4	195	392.8	706.9	1227.1	1893.8	2571.1	3490.7	4581.3
Zircon-224		21.21	1.23	5.3	13.1	32.23	12.1	168	331	630.9	1120.9	1766.3	2417.7	3309.3	4410.57
Zircon-225	0.07	16.26	1	4.84	12.6	33.04	19.2	172	351	627.2	1141	1807.5	2467.4	3368.3	4552.85
Zircon-227	0.09	52.5	1.34	6.48	18.7	54.12	18.1	285	573.4	1025	1853.5	2853.8	3856.4	5211.2	6617.89
Zircon-228		12.94	0.61	2.39	6.85	19.66	7.69	109	221.3	405.3	730.77	1178.1	1652.1	2316.8	3113.82
Zircon-229	1.56	44.96	4.63	10.3	25.5	62.97	22.7	287	573.7	1022	1793	2768.8	3732.3	5031.1	6528.46
Zircon-230	0.01	13.54	0.86	3.52	9.04	23.18	8.63	107	219.7	416.3	779.49	1245.6	1760.7	2488.8	3426.83
GR-6597	La	Ce	Pr	Nd	Pm*	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm*	Yb	Lu
Zircon_073	0.08	6.41	0.23	1.46	2.64	4.75	0.68	17.1	7.17	98.74	45.5	256.97	425.14	703.36	6758.65
Zircon_075	0.14	7.42	0.11	2.05	2.71	3.58	1	22.7	8.97	117.5	51.92	260.69	394.32	596.44	5063.29
Zircon_077	0.42	15.54	0.22	3.53	4.31	5.27	1.26	32.1	13.04	167	71.62	362.11	545.04	820.39	7047.05
Zircon_078	0.06	7.95	0.48	3.09	4.01	5.19	1.94	35.4	14.11	198.4	85.35	462.64	768.13	1275.4	11787.3
Zircon_079	0.41	9.22	0.24	3.08	3.16	3.24	1.21	20.4	8.07	115.1	53.1	283.38	445.73	701.09	6210.91
Zircon_082	0.33	7.28	0.16	3.14	3.62	4.17	1.24	27.6	10.81	148.5	64	338.19	524.34	812.96	7546.29
Zircon_083	29	118.1	13.02	68	44.9	29.64	2.61	78.3	24.51	292.7	117.37	566.99	838.5	1240	10921.7
Zircon_084	0.24	5.49	0.33	1.48	1.84	2.3	0.57	16.3	5.93	80.15	36.63	196.21	326.2	542.29	5014.26
Zircon_085	0.12	8.59	0.08	2.28	2.3	2.32	1.14	22.3	7.93	109.8	47.46	244.75	370.93	562.16	5039.68
Zircon_087	0.5	12.87	1.04	12.7	12.2	11.77	0.97	55	19.07	232.8	94.5	477.96	712.64	1062.6	9141.96
Zircon_088	0.24	18.37	0.22	2.11	3.01	4.29	1.27	40.1	16.51	223.9	98.1	515.07	791.23	1215.5	11072.9
Zircon_090	0.22	8.38	0.31	2.18	2.76	3.48	0.96	23.8	8.52	122.9	54.09	276.44	430.97	671.87	5913.15
Zircon_094	0.79	12.85	0.59	3.19	3.22	3.25	0.95	18.8	6.78	94.32	40.42	207.52	315.07	478.36	4164.92
Zircon_097	1.1	33.23	1.03	7.79	8.33	8.9	0.76	41	18.92	284.9	136.09	805.48	1384.5	2379.7	23878.8
Zircon_098	0.14	7.02	0.24	3.04	4.45	6.51	1.36	27	10.69	141.6	62.98	335.45	542.52	877.42	8193.42
Zircon_099	0.24	2.59	0.21	1.45	1.9	2.49	1.01	13.6	5.61	88.96	40.84	231.71	412.83	735.51	7048.2

Fuente: Los autores

circones una deflexión del europio que es interpretada como producto de fraccionamiento magmático, con una tendencia hacia las rocas félsicas [1] (Belousova *et al.*, 2002), que se incorpora como Eu^{2+} en la cristalización de plagioclasa, reduciendo el contenido en el magma residual [6] Hoskin & Schaltegger (2003). Las dos muestras presentan rasgos similares con fuerte anomalía positiva en Ce que indica

cristalización en las primeras fases de fraccionamiento magmático [12] Nardi *et al.* (2013), y leve en Sm. Se observa decaimiento además del Eu en Pr, la pendiente entre Gd y Lu es ascendente, Fig. 11. Las anomalías menos marcadas para los elementos mencionados se presentan en el circón 099 de la muestra GR-6597 en la Tabla 5.

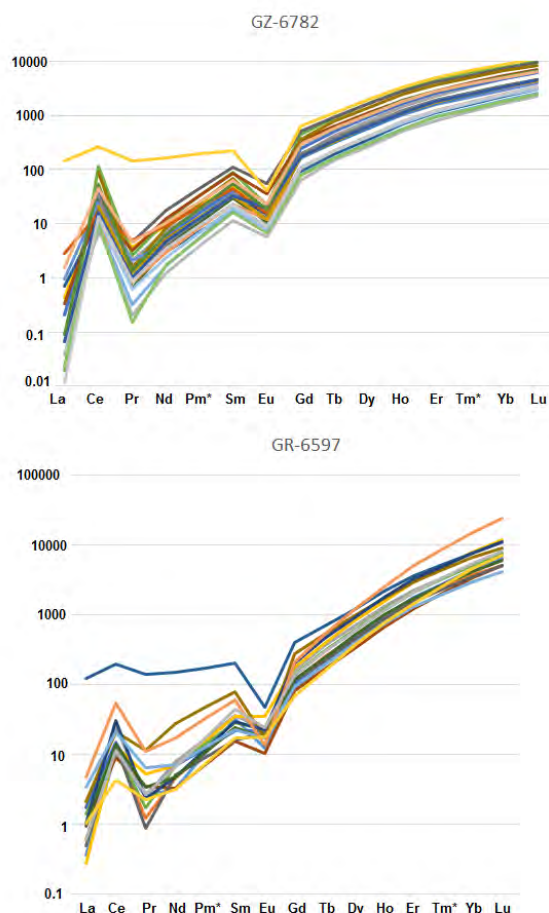


Figura 11. Diagrama REE (McDonough & Sun, 1995), para los circones de las muestras GZ-6782 y GR-6597.

Fuente: Los autores

4. Geocronología

4.1. Complejo Migmatítico de La Cocha – Río Téllez

De esta unidad se realizaron dos dataciones por el método U-Pb en circones sobre muestras tomadas del mismo afloramiento. El primer fechamiento se hizo a partir de un concentrado de circones obtenido de un saprolito (GZ-6782); la datación fue hecha en el laboratorio del Servicio Geológico Colombiano, por el Grupo de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares y Geocronología (GIANG-SGC), mediante el método *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (LA-ICP-MS).

Un segundo análisis geocronológico se adelantó a partir de la muestra de roca GZ-6782dup (900798) que corresponde a un esquistos de Qtz-Pl-Kfs-Bt con granate, mediante trituración de la roca y concentración de circones. Éstos se analizaron en el laboratorio de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el método *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (LA-ICP-MS).

De la muestra de saprolito se extrajeron 42 circones y de la roca GZ-6782dup se obtuvieron 55 circones, a estas muestras se le realizó un análisis estadístico para mejorar el rango de confiabilidad de la edad, para ello se tuvo en cuenta la relación $[(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) - (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) / ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}]$ y se eliminaron los datos con valores discordantes >10%, la muestra de saprolito se redujo a n=36 y la de roca GZ-6782dup a n=25 circones. El gráfico de concordia e histogramas se elaboraron en el *software de Isoplot/Ex vers. 4.15* [12] Ludwig (2008).

Ambas muestras tienen circones de forma y tamaño comparable: se presentan como cristales euhedrales a subhedrales, de diversos tamaños entre 40 y 450 μm , predominando los prismáticos en el rango entre 50 y 80 micras; de color amarillo pálido a rosado pálido, algunos incoloros y pueden tener inclusiones. En las imágenes de catodoluminiscencia (CL), algunos circones son homogéneos y otros zonados sin claros sobre crecimientos metamórficos, otros presentan núcleos más oscuros, que podrían interpretarse como xenocristales o bien como zonas empobrecidas en tierras raras, Fig. 12.

La muestra GZ-6781, localizada aproximadamente a 1 km de GZ-6782, corresponde a un granofels del Complejo Migmatítico La Cocha-Río Téllez. Contiene circones inequigranulares, euhedrales a subhedrales de forma prismática corta y alargada, con tamaños entre 50 y 900 micras, predominan los tamaños entre 200 y 500 μm , Fig. 13, circones de incoloros a amarillo pálido, algunos presentan zonación; fracturas abundantes, rellenas por óxidos de color pardo.

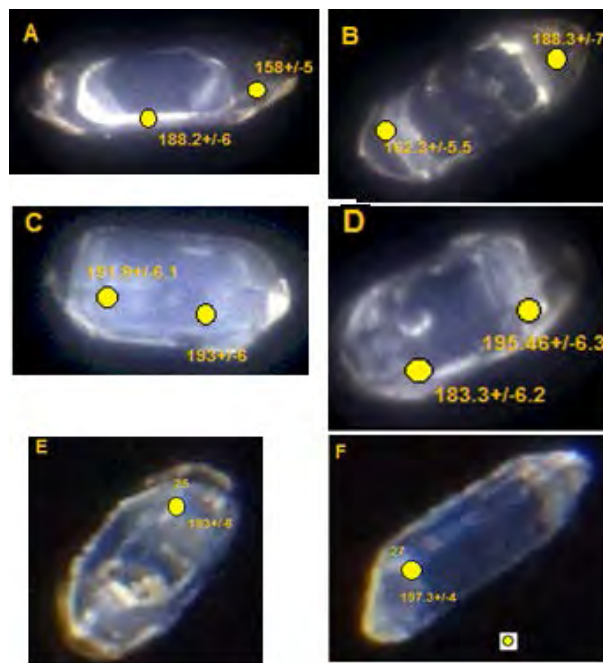


Figura 12. Imágenes de catodoluminiscencia de circones de las muestras GZ-6782 saprolito (A, B, C, D) y GZ-6782Dup (E, F). A y B circones con bordes metamórficos de sobre crecimiento y núcleos heredados.

Fuente: Los autores

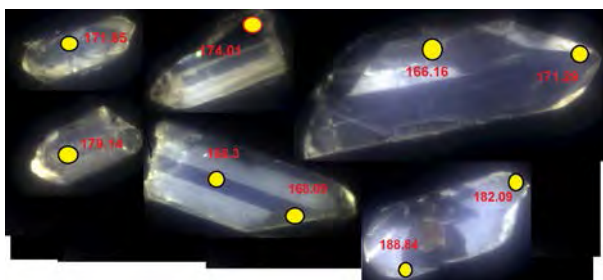


Figura 13. Imágenes de catodoluminiscencia de circones de las muestras GZ-6781.

Fuente: Los autores

En la Fig. 14 se presentan los diagramas de probabilidades de edades en circones de las muestras GZ-6782 de saprolito y roca. La relación Th/U de los circones de la muestra GZ-6782 (saprolito), varía entre 0.014 y 0.983, en cuatro circones la relación Th/U <0.1, Fig. 15, se asocia con circones metamórficos (Rubatto, 2002). Los puntos de ablación están

localizados en los bordes de los cristales, en zonas de sobre crecimiento metamórfico que presentan edades entre 158 y 165 Ma, con una edad promedio ponderada de 163.6 ± 4.7 Ma, que se interpretan como la posible edad del metamorfismo, Fig. 15 y Tabla 5. La segunda población tiene valores de Th/U por encima de 0.1 y presenta edades entre 176 y 205 Ma con edad promedio de 189.4 ± 2.35 Ma, que se interpreta como una probable edad ígnea heredada, Fig. 15B; además, presenta un xenocristal que arrojó una edad de 587 Ma (neo proterozoico). La roca GZ-6782dup los circones tienen relaciones Th/U entre 0.12 y 1.22, la mayoría cercanas a 1, tres de ellas con valores >1, Fig. 15B), valores que sugieren que se trata de circones ígneos, arrojó una edad promedio ponderada de 194.4 ± 2.0 Ma que correspondería a la edad de los circones ígneos en la roca, Fig. 16E y 16F y Tabla 6; además presenta dos edades heredadas de 218.8 Ma y 229.8 Ma (Triásico). No se obtuvo ningún dato que mostrara la edad de metamorfismo.

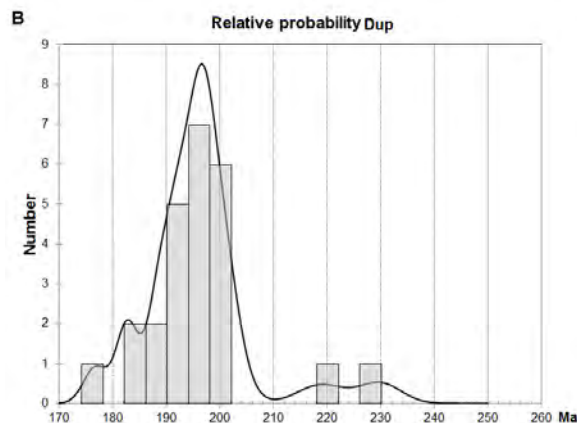
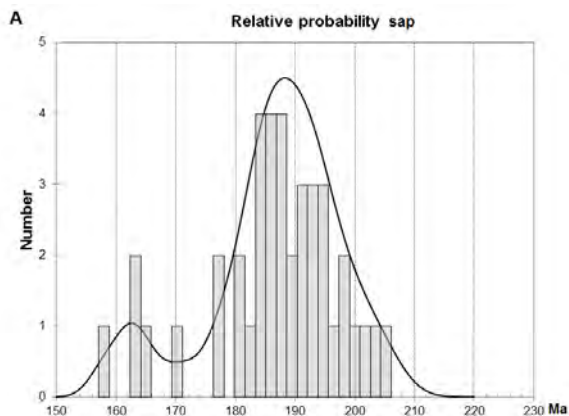
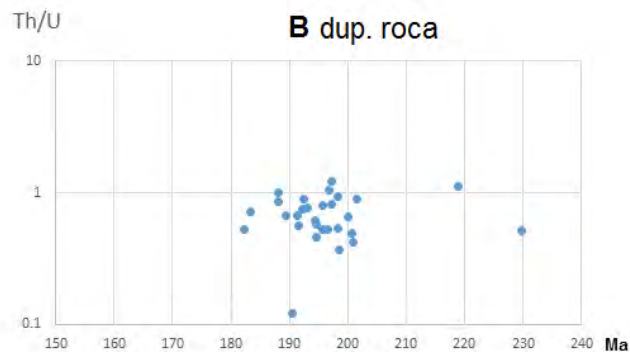
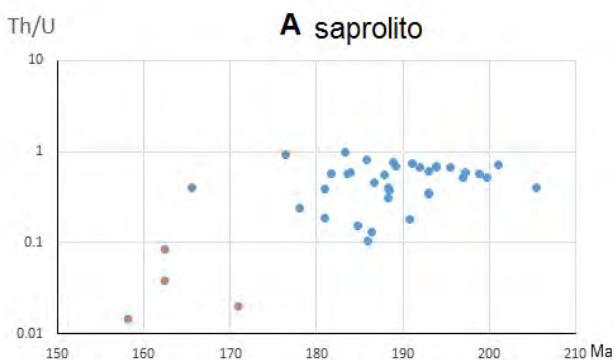


Figura 14. Diagrama de probabilidad en circones. A) Muestra GZ-6782 y B) GZ-6782 Dup, Complejo La Cocha-Río Téllez.

Fuente: Los autores



● Circones metamórficos, relaciones Th/U <0.1

Figura 15. Relaciones Th/U vs edad en los circones de las muestras A) GZ-6782 saprolito y B) GZ-6782Dup roca, Complejo La Cocha-Río Téllez.

Fuente: Los autores

Tabla 6.

Resultados de geocronología en el esquistos de Qtz, Kfs, Bt con Grt en la vereda El Diamante, municipio de San Francisco, Putumayo.

IGM	N Campo	N	W	Localización	Clasificación	Edad U/Pb (Ma)	
	GZ-6782 saprolito	622789	688854	Vereda el Diamante	Esquistos de Qtz, Kfs, Bt	163.6±4.7	J ₂ Calloviano
	GZ-6782 saprolito	622789	688854	Vereda el Diamante	Esquistos de Qtz, Kfs, Bt	189.4±2.3*	J ₁ Sinemuriano
900798	GZ-6782dup	622789	688854	Vereda el Diamante	Esquistos de Qtz, Kfs, Bt con Grt.	194.4±2.0*	J ₁ Pliensbachiano

Sombreado edad metamórfica * Edades ígneas heredadas

Fuente: Los autores.

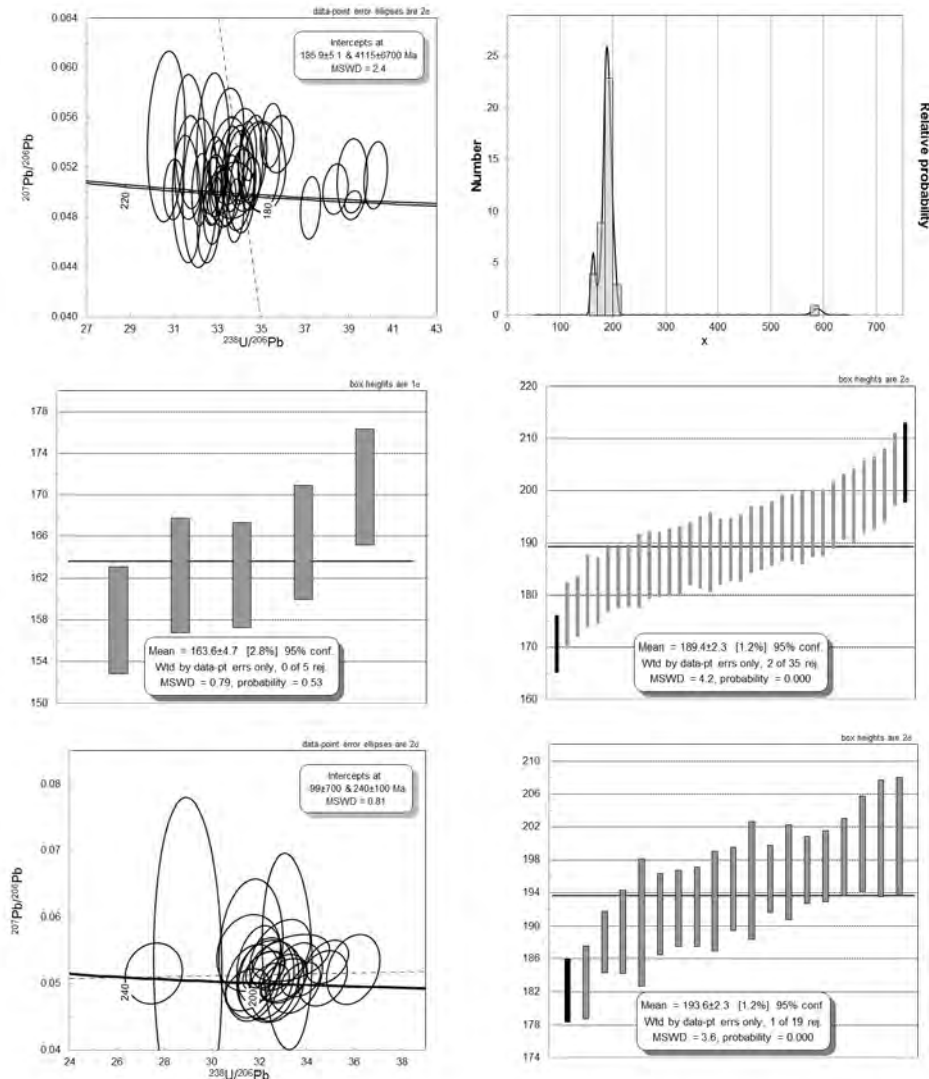


Figura 16. Diagramas de concordia Tera Wasserburg y cálculo de la edad media ponderada para la muestra GZ-6782 (A, B, C, D) y GZ-6782dup (E, F), tomada en el Complejo La Cocha-Río Téllez.

Fuente: Los autores

4.2. Complejo Aleluya

De esta unidad se realizaron dos dataciones en el laboratorio de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por el método U/Pb en circones, sobre las muestras de roca GR-6596 y GR-6597 clasificadas petrográficamente como granofels.

De la muestra GR-6596 (900671) se extrajeron 35 circones y de la GR-6797 se obtuvieron 41 circones, después del análisis estadístico para mejorar el rango de confiabilidad de la edad relacionada por el laboratorio, según la relación $[(207\text{Pb}/235\text{U}) - (206\text{Pb}/238\text{U})/206\text{Pb}/238\text{U}]$ se eliminaron los datos con valores discordantes >10%, la muestra GR-6596 se redujo a 35 y la GR-6797 a 21 circones. El gráfico

de concordia e histogramas se elaboraron en el software de Isoplot/Ex vers. 4,15 [8] Ludwig (2008).

Los circones de la muestra GR-6596 son euhedrales a subhedrales, la mayoría euhedrales; predominando los prismáticos cortos; algunos con formas redondeadas, la mayoría incoloros. La ablación en esta muestra GR-6596 se hizo en el límite entre el núcleo zonado y los bordes, Fig. 17A.

Los circones de la muestra GR-6597 son prismáticos alargados, euhedrales a subhedrales, con tamaño $\leq 100 \mu\text{m}$, varios de ellos fragmentados; los puntos de ablación se hicieron hacia los núcleos en los cristales, Fig. 17B.

La relación Th/U en los circones de la muestra GR-6596, varían entre 0.214 y 1.559, seis de ellas con valores >1 (Figura 18 A). La relación Th/U en la muestra GR-6596, varía entre 0.154 y 2.443, tres de ellas con valores >1 , Fig. 18B. Las edades de los circones de la muestra GR-6596, Fig. 19A y 19C, proyectan tres grupos de datos, el más joven entre 166.6 y 172.4 Ma (4 muestras) con edad promedio de 169.1 ± 2.7 Ma, Fig. 19B y una relación Th/U ≤ 0.48 , se interpreta como la probable edad de cristalización de la roca, otro grupo de cinco datos presentan edades entre 179.5 y 185.5 Ma con edad promedio de 181.9 ± 2.7 Ma, Tabla 5 y la mayoría de los resultados (25 muestras) se encuentran entre 191.8 y 207.5 Ma con promedio de 197.8 ± 1.6 Ma, Fig. 19D que se interpretan como edades heredadas.

Los circones de la muestra GR-6597 son prismáticos alargados, euhedrales a subhedrales, con tamaño $\leq 100 \mu\text{m}$, varios de ellos fragmentados; los puntos de ablación se hicieron hacia los núcleos en los cristales, Fig. 17B.

La relación Th/U en los circones de la muestra GR-6596, varían entre 0.214 y 1.559, seis de ellas con valores >1 (Figura 18 A). La relación Th/U en la muestra GR-6596, varía entre 0.154 y 2.443, tres de ellas con valores >1 , Fig. 18B. Las edades de los circones de la muestra GR-6596, Fig. 19A y 19C, proyectan tres grupos de datos, el más joven entre 166.6 y 172.4 Ma (4 muestras) con edad promedio de 169.1 ± 2.7 Ma, Fig. 19B y una relación Th/U ≤ 0.48 , se interpreta como la probable edad de cristalización de la roca, otro grupo de cinco datos presentan edades entre 179.5 y 185.5 Ma con edad promedio de 181.9 ± 2.7 Ma, Tabla 5 y la mayoría de los resultados (25 muestras) se encuentran entre 191.8 y 207.5 Ma con promedio de 197.8 ± 1.6 Ma, Fig. 19D que se interpretan como edades heredadas.

Las edades de los circones de la muestra GR-6597 oscilan entre 169.8 y 235.5 Ma, en el diagrama de concordia Tera Wasserburg y gráfico de probabilidad relativa, Fig. 19E y 19C, se observan tres poblaciones de datos, una compuesta por cinco datos con edad promedio 175.6 ± 4.7 Ma con MSWD 1.6, Fig. 19F, la cual se interpreta como la posible edad de cristalización de la roca; otra con la mayoría de los análisis realizados entre 187.4 y 202.3 Ma, con edad promedio de 194.6 ± 3.2 Ma con MSWD 2.6, Fig. 19H y Tabla 7. El tercer grupo corresponde a los tres circones más antiguos que presentan edades heredadas entre 212.5 y 218.6 Ma, con una edad promedio ponderada de 216.7 ± 4.6 n=3 y MSWD= 0.62 y un circón heredado de 235.5 Ma.

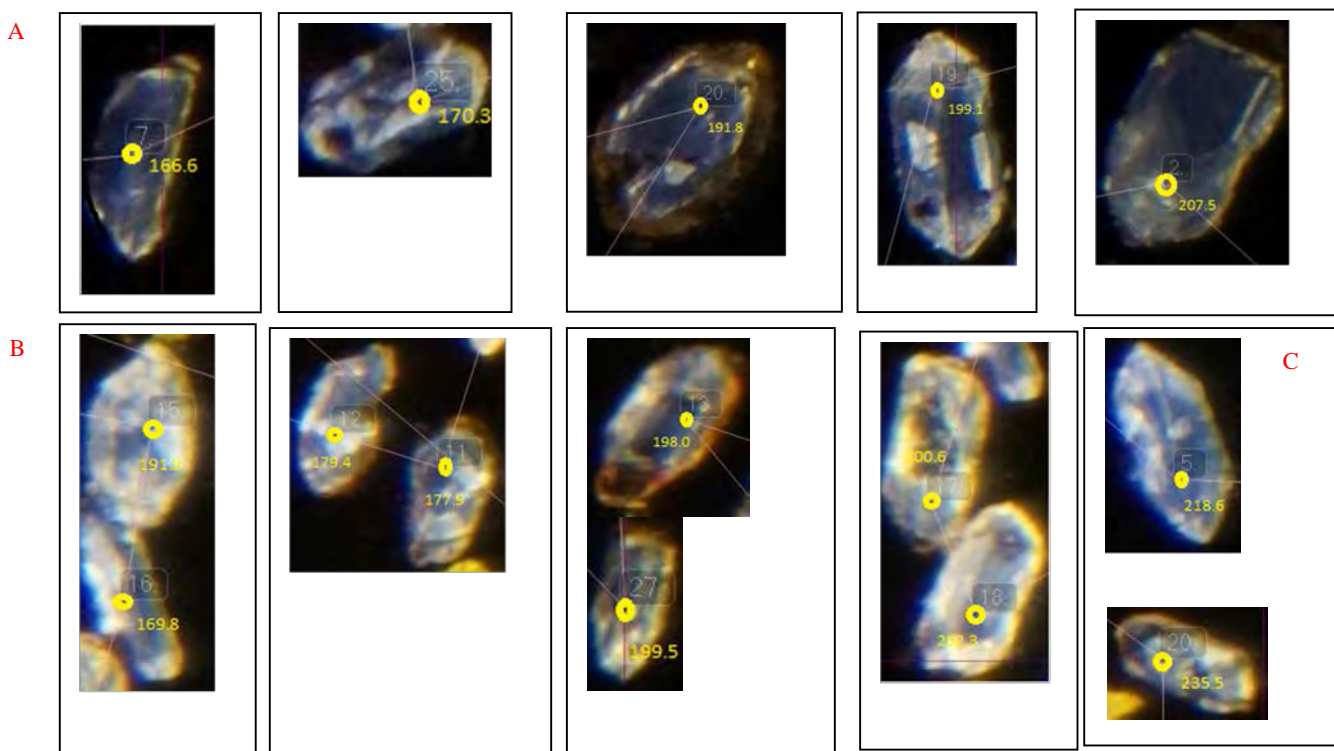


Figura 17. A) Imágenes de catodoluminiscencia de circones de las muestras GR-6596. B) GR-6597. C) circones heredados en GR-6597.

Fuente: Los autores

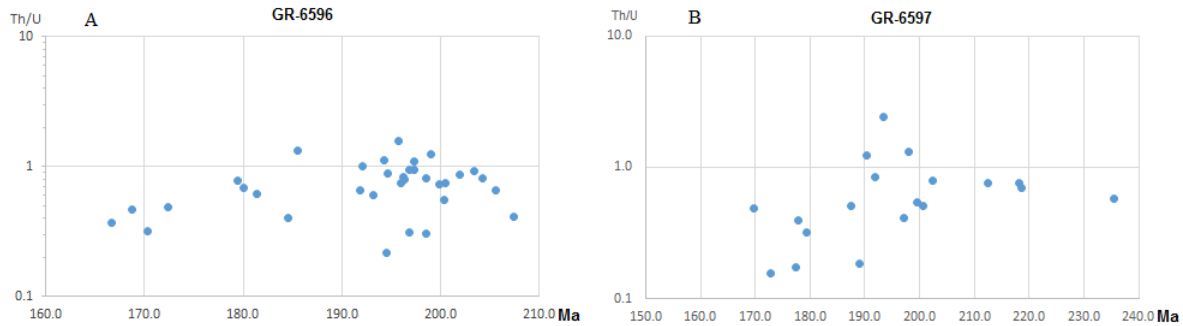


Figura 18. Relaciones edad en Ma vs Th/U en ppm1 en los circones. A) Para GR-6596. B) Para la muestra GR-6597.

Fuente: Los autores

Tabla 7.

Resultados de geocronología de las muestras de granofels GR-6596 y GR-6597 del Complejo Aleluya en la Plancha 323.

IGM	N Campo	N	W	Localización	Clasificación	Edad UPb (Ma)	Piso
900671	GR-6596	823861	843820	Vía San Luis	Granofels de Qtz-Pl- Bt	197.8±2.5	J ₁ Hettangiano
900671	GR-6596	823861	843820	Vía San Luis	Granofels de Qtz-Pl- Bt	169.1±2.7	J ₂ Bajociano
900672	GR-6597	824348	843798	Vía San Luis	Granofels de Qtz-Pl-Bt-Hbl	194.6±3.2	J ₁ Sinemuriano
900672	GR-6597	824348	843798	Vía San Luis	Granofels de Qtz-Pl-Bt-Hbl	175.6±4.7	J ₂ Aaleniano

Fuente: Los autores

5. Conclusiones y discusión

Las características macro y microscópicas de rocas del Complejo La Cocha-Río Téllez indican que la muestra GZ-6782 se formó a partir de un protolito de roca pelítica y desarrolló textura granolepidoblástica debida a metamorfismo regional dinamo térmico. Las muestras GZ-6781 y GZ-6783 corresponden a granofels con protolito de roca plutónica diorítica.

Para las muestras GR-6596 y GR-6597 del Complejo Aleluya, el protolito corresponde a una roca cuarzofeldespática ígnea.

Los minerales metamórficos que conforman estas rocas son: plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, biotita, hornblenda, moscovita, granate, esfena y apatito. La paragénesis de GZ-6782 es cuarzo-plagioclasa-feldespato-biotita y granate, para las muestras GZ-6781 y GZ-6783 es -plagioclasa- cuarzo-feldespato- hornblenda y para las muestras GR-6596 y GR-6597 es cuarzo-plagioclasa-hornblenda-biotita-epidota-titanita, en facies anfíbolita.

A los circones de las muestras GZ-6782 y GR-6597 se les realizó análisis de ICP-MS, tienen un patrón de pendientes positivas hacia las HREE, con una deflexión del europio, las dos muestras presentan fuerte anomalía positiva en Ce y leve en Sm. Se observa decaimiento en Pr, la pendiente entre Gd y Lu es ascendente.

La muestra GZ-6782 presenta una edad promedio de 163.6±4.7, que se asume como la edad del metamorfismo del Complejo La Cocha – Río Téllez, con relación Th/U<0,1 en cuatro circones. La segunda población, arrojó una edad promedio ponderada de 189.4±2.3 Ma con relación Th/U>0,1 y cercana a uno (1), se interpreta como edad de cristalización de la roca. La muestra GZ-6782dup arrojó una edad de 194.4±2.0 Ma, con relación Th/U entre 0,1 y 1, que se interpreta como edad de

cristalización de la roca, además, presenta dos circones con edades triásicas heredadas de 218.8 Ma y 229.8 Ma. El Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez fue considerado en la literatura geológica colombiana de edad precámbrica, edad basada únicamente en correlación litológica con rocas del Grupo Garzón. Dos edades obtenidas en este trabajo de un saprolito y a partir de roca del mismo afloramiento, sugieren una edad de metamorfismo de 163.6±4.7 Ma y edades de cristalización ígnea de 189.4±2.3 y 193.6±2.3 Ma.

Las edades U-Pb en circones obtenidas en rocas metamórficas clasificadas como granofels, relacionados al Complejo Aleluya y localizadas en el contacto con la Cuarzomonzodiorita de Páez (muestras GR-6596 y GR-6597), presentan para la muestra GR-6596 tres poblaciones de datos: la edad más joven ponderada es de 169.1±2.7 Ma, n=4 MSWD=0.85, la segunda población dio una edad promedio de 181.9±2.7 Ma, n=5 y una tercera población con edad promedio de 197.8±2.5 Ma. Para la muestra GR-6597, el grupo de circones con fechamiento más joven arrojó una edad promedio de 175.6±4.7 Ma; una segunda población dio una edad promedio de 194.6±3.2 Ma y edades heredadas de 212.5, 218.6 y 235.5 Ma. Todas las edades en circones mostraron relación Th/U cercana a 1 que se asocia a circones ígneos.

Al comparar las edades obtenidas en las dos muestras de granofels, localizadas dentro de la zona de contacto entre la Cuarzomonzodiorita de Páez y el Complejo Aleluya y teniendo en cuenta las edades U/Pb reportadas para la Cuarzomonzodiorita de Páez [25] Zapata et al. (2015) y las edades de los pulsos magmáticos jurásicos en el Valle Superior del Magdalena [18] Rodríguez et al. (2015), se aprecia que hay correspondencia entre las edades encontradas en los granofels y las edades de los pulsos del magmatismo jurásico del VSM.

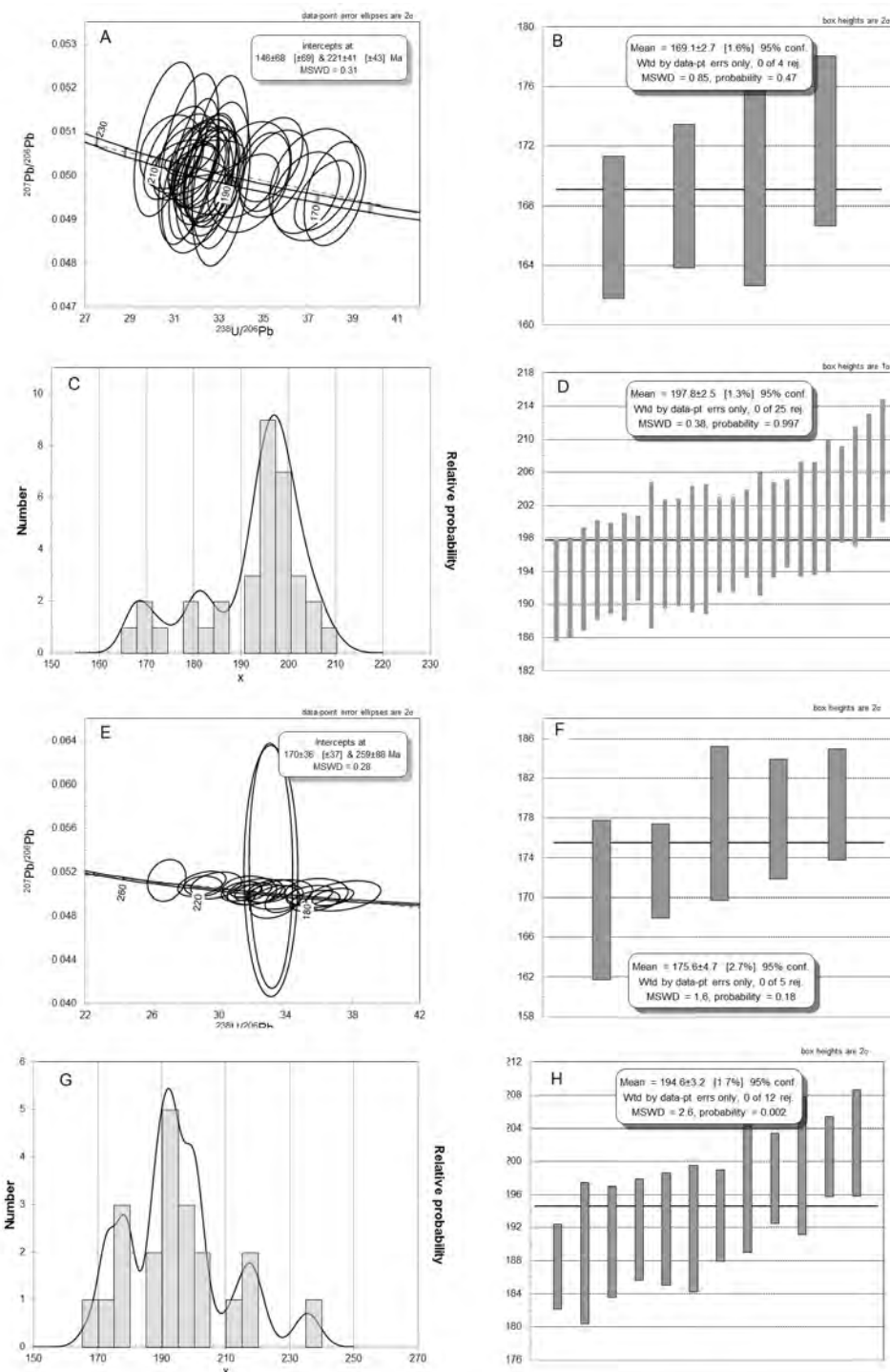


Figura 19. , B, C, D) Diagramas concordia, gráfico de probabilidades y cálculo de la de la edad media y desviación estándar para las edades U-Pb de la muestra GR-6596. E, F, G, H) para la de la muestra GR-6597.
Fuente: Los autores

Los mármoles, metareniscas y cuarcitas del Complejo Aleluya se encuentran intruidos por rocas la Cuarzomonzodiorita de Páez [25] Zapata et al. (2015). La edad mínima del Complejo Aleluya por relaciones

estratigráficas debe ser anterior a 193 ± 1.4 Ma, edad U-Pb más antigua encontrada en la Cuarzomonzodiorita de Páez. Las edad ígnea obtenida en este trabajo en rocas migmatíticas (granofels) que aparecen como parte del Complejo Aleluya,

son más jóvenes que las de la Cuarzomonzodiorita de Páez y las edades heredadas son comparables, por tal razón, las rocas migmatíticas deben ser consideradas aparte del Complejo Aleluya y separadas de la Cuarzomonzodiorita de Páez.

Las edades ígneas jurásicas en muestras asociadas a los complejos Aleluya y La Cocha – Río Téllez son comparables, así como edades heredadas triásicas obtenidas en algunos circones. No se obtuvieron edades metamórficas en las muestras de granofels migmatíticos asociados al Complejo Aleluya, pero no se descarta la posibilidad de que tenga edades metamórficas similares a los esquistos del Complejo La Cocha – Río Téllez, que arrojaron una edad metamórfica alrededor de 163 Ma.

Las edades jurásicas metamórficas encontradas en rocas relacionadas al Complejo La Cocha - Río Téllez, utilizando el método U/Pb en circones, son ligeramente anteriores a las reportadas por [3] Blanco-Quintero et al. (2014) en anfibolitas deformadas y esquistos pelíticos con granate obtenidas en la vía Ibagué – Cajamarca, en posición geotectónica similar y que arrojaron edades Ar-Ar entre 147 y 158 Ma, pudiendo ser correlacionables entre sí y representarían bloques metamórficos de edad Jurásico superior, diferentes al basamento Permo Triásico del Complejo Cajamarca, acrecionados y localizados al oriente de éste.

Referencias

- [1] Belousova, E.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S. Y. and Fisher, N.I. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143 pp. 602-622, 2002.
- [2] Bermúdez J.G., Zapata G., Rodríguez, G. y Arango M.I., Catálogo de Unidades Litoestratigráficas de Colombia: Cuarzomonzonita de Sombrerillo, Cordillera Central, Huila-Putumayo, Bogotá, Servicio Geológico Colombiano. 2016, 61 P.
- [3] Blanco-Quintero, I.F., García-Casco, A., Toro, L.M., Moreno, M., Ruiz, E.C., Vinasco, C.J., Cardona, A., Lázaro, C. and Morata, D., Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia). *International Geology Review*, 56(15), pp. 1852-1872, 2014.
- [4] Ferreira, P., Núñez, A., Rodríguez, M.A., Memoria explicativa levantamiento geológico de la Plancha 323 Neiva. Escala 1:100.000, Bogotá, Ingeominas, 2002, 100 P
- [5] Fuquen, J.A. y Núñez, A., Mapa geológico generalizado del departamento del huila. geología, recursos minerales y amenazas geológicas.- Esc. 1:400.000, Santafé de Bogotá, Ingeominas, 1989.
- [6] Hoskin, P.W.O. and Schaltegger, U., The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, pp. 27–62. 2003.
- [7] Hutchison, C.S., *Laboratory Handbook of Petrographic Techniques*, John Wiley & Sons, 1974, 527 P.
- [8] Ludwig, K., Isoplot version 4.15: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 4, 2008.
- [9] McDonough, W.F. and Sun, S.S., The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, pp. 223-253, 1995.
- [10] Murcia, A. y Cepeda, H., Estudio geológico del Complejo Migmatítico de La Cocha-río Téllez, Popayán, Ingeominas, informe interno. 1983, 15 P.
- [11] Nakamura, N., Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38 pp. 757-775, 1974.
- [12] Nardi, L.V.S., Formoso, M.L.L., Müller, I.F., Fontana, E., Jarvis, K. and Lamarão, C., Zircon/rock partition coefficients of REEs, Y, Th, U, Nb, and Ta in granitic rocks: Uses for provenance and mineral exploration purposes. *Chemical Geology*, 335, pp. 1-7, 2013.
- [13] Núñez, A., Reconocimiento geológico regional de las planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 431 Piamonte, 448 Monopamba, 449 Orito y 465 Churuyaco. Memoria explicativa, escala 1:100.000, Bogotá Ingeominas, 263 P. 2003.
- [14] Paton, C., Woodhead, J.D., Hellstrom, J.C., Hergt, J.M., Greig, A., and Maas, R. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 11(3), 36 P, 2010.
- [15] Peccerillo A. and Taylor, T.S., Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1) pp. 63-81, 1976.
- [16] Petrus, J.A., and Kamber, B.S., VizualAge: A novel approach to laser ablation ICP-MS U-Pb Geochronology Data Reduction: *Geostandards and Geoanalytical Research*, 36(3) pp. 247-270, 2012.
- [17] Ponce, A., Anotaciones sobre geología de la parte SE del departamento de Nariño, Bogotá Ingeominas, 1979, inf. 1769, 53 P.
- [18] Rodríguez, G., Arango, M.I., Zapata, G. y Bermúdez, J.G., Caracterización magmática del Jurásico del Valle Superior del Magdalena y Cuenca Putumayo, Bogotá, Servicio Geológico Colombiano, 2015, 395 P.
- [19] Rubatto, D., Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb age and metamorphism. *Chemical Geology*, 184, pp. 123-138, 2002.
- [20] Shand, S.J., *Eruptive Rocks. their genesis, composition, classification, and their relation to ore-deposits with a chapter on meteorite*, New York, John Wiley & Sons, 1943, 444 P.
- [21] Solari, L., Gómez-Tuena, A., Bernal, J., Pérez-Arvizu, O. and Tanner, M., U-Pb Zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical workstation: Achievements in precision and accuracy, *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34, pp. 5-18, 2010.
- [22] Stacey, J.S. and Kramers, J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a 2-Stage model, *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2), pp. 207-221, 1975.
- [23] Sun, S.S. and McDonough, W.F., Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes En Sanders, A.D., Norry, M.J. (Eds.). *Magmatism in oceanic basins*. Geological Society of London, Special Publication, (42) pp. 313-345, 1989.
- [24] Toussaint, J.F y Restrepo, J.J., Modelos orogénicos de tectónica de placas en los Andes Colombianos, *Revista Boletín Ciencias de la Tierra*, 1, pp. 1-47. 1976.
- [25] Zapata G., Rodríguez, G., Arango M.I. y Bermúdez, J.G., Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia: Cuarzomonzodiorita de Páez – Cordillera Central, Cauca-Huila, Bogotá, Servicio Geológico Colombiano, 2015, 52 P.

G. Zapata García, recibió el título de Ing. Geólogo de Minas en 1977 en el Instituto de Exploración Geológica de Moscú (URSS), Esp. en Planeación Urbano-Regional de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Ha trabajado durante 38 años en el Ingeominas, hoy Servicio Geológico Colombiano, desarrollando labores de cartografía regional principalmente en las cordilleras Occidental y Central, actualmente es Profesional Especializado del Servicio Geológico Colombiano y participa en el Grupo de Estudios Geológicos Especiales sede Medellín.
ORCID: 0000-0002-4961-587X

G. Rodríguez García, se graduó como Ing. Geólogo en 1987 en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, posteriormente realizó estudios de especialización en la Escuela de Minas de París en 1995 y se

especializó en Evaluación Técnico – Económica de Proyectos Mineros, ha trabajado durante 28 años en el Ingeominas hoy Servicio Geológico Colombiano, donde se ha desempeñado como jefe de cartografía de la sede regional del Ibagué, Coordinador de proyectos y grupos de trabajo de cartografía regional y exploración y evaluación de yacimientos, y actualmente coordina la sede Medellín y el Grupo de Estudios Geológicos Especiales del Servicio Geológico Colombiano. Ha sido profesor de Geología de Colombia, Geología de Campo I y Geología física en la Universidad EAFIT, desempeño el cargo de Director de Geología del Grupo Argos, tiene más de 100 publicaciones correspondientes a mapas geológicos – memorias y artículos científicos en geología.

ORCID: 0000-0003-1422-3523

M.I. Arango Mejía, Geóloga egresada de la Universidad de Caldas en el año 2008 y Esp. en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad San Buenaventura en el año 2016, desempeñó actividades en el Grupo de Estudios Geológicos Especiales del Servicio Geológico Colombiano, proyectos sísmicos, cartografía regional y actualmente en proyectos ambientales.

ORCID: 0000-0002-4296-9798

Inventory of the sites of geological interest, in the southwestern of Antioquia Colombia

Albeiro Rendón-Rivera, Ángela María Henao-Arroyave & Juan Guillermo Osorio-Cachaya

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. arendonr@unal.edu.co, amhenaoa@unal.edu.co, jgosorioc@unal.edu.co

Received: December 20th, 2015. Received in revised form: October 1st, 2016. Accepted: December 15th, 2016.

Abstract

This research sought, the inventory of sites of geological interest, in the southwestern Antioquia region consists of 24 municipalities and a total area of 6513 km², taking as a scale for analysis 1: 25,000 and used several sources of primary information and secondary. The methodology used was exploratory and was based on: literature review, collection of primary data through virtual and surveys, fieldwork for the surveys, visiting outstanding sites and a workshop in schools, finally ending with integration and analysis of all information collected. As important results, it has an inventory of 168 points of geological interest, which is noted for its natural intrinsic attributes or tourism management plans and associated conservation. Of these, 44 sites stand out for their recognition among population, listed among the first, Cerro Tusa (20.1%) of La Pintada Farallones (12.4%), the Citara Farallones (7.7%), the Paramo del Sol and Cerro Bravo (7.1). Finally, municipalities with a larger number of geological sites of interest were reported Jardín (11.9%), Caicedo (11.3%) and Andes, Jericó y La Pintada (6%), and fewer reports Betania who obtained (0.6%).

Keywords: Sites of Geological Interest, Geotourism, Southwestern Antioquia, Geological Heritage.

Inventario de sitios de interés geológico en el suroeste Antioqueño Colombia

Resumen

Esta investigación buscó, realizar el inventario de los sitios de interés geológico, en la zona del suroeste antioqueño, región conformada por 24 municipios y una superficie total de 6513 Km², tomándose como escala para el análisis 1:25.000 y utilizándose varias fuentes de información primaria y secundaria. La metodología utilizada, fue de tipo exploratorio y se fundamentó en: revisión bibliográfica, recopilación de información primaria a través de encuestas virtuales y presenciales, trabajo de campo para la realización de encuestas, con visita a sitios destacados y un taller en colegios, terminando finalmente con la integración y análisis de toda la información recopilada. Como resultados importantes, se tiene un inventario de 168 puntos de interés geológico, los cuales se destacan por sus atributos intrínsecos naturales o el reconocimiento social que se tiene de ellos. De estos, 44 sitios sobresalen por su reconocimiento entre población, listados entre los primeros se tiene a Cerro Tusa (20.1%), Farallones de La Pintada (12.4%), Farallones del Citará (7.7%), el Páramo del Sol y Cerro Bravo (7.1); Finalmente, los municipios con mayor número de sitios de interés geológico reportados fueron Jardín (11.9%), Caicedo (11.3%) y Andes, Jericó y La Pintada (6%), siendo Betania quien menos reportes obtuvo (0.6%).

Palabras clave: Sitios de Interés Geológico, Geoturismo, Suroeste Antioqueño, Patrimonio Geológico.

1. Introducción

El patrimonio geológico es actualmente uno de los temas de las agendas de investigación a nivel internacional, debido a que representa un elemento de gran importancia, al hacer parte de la potencialidad de los recursos naturales que puede

ofrecer una región [1].

En Colombia el tema del patrimonio geológico como objeto de investigación ha sido abordado en casos puntuales y metodologías muy diversas, pero aún no ha sido incorporado en la gestión ambiental de las entidades

How to cite: Rendón-Rivera, A., Henao-Arroyave, A. M. & Osorio-Cachaya, J.G., Inventario de sitios de interés geológico en el suroeste antioqueño - Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, (41), 66-72, 2017.

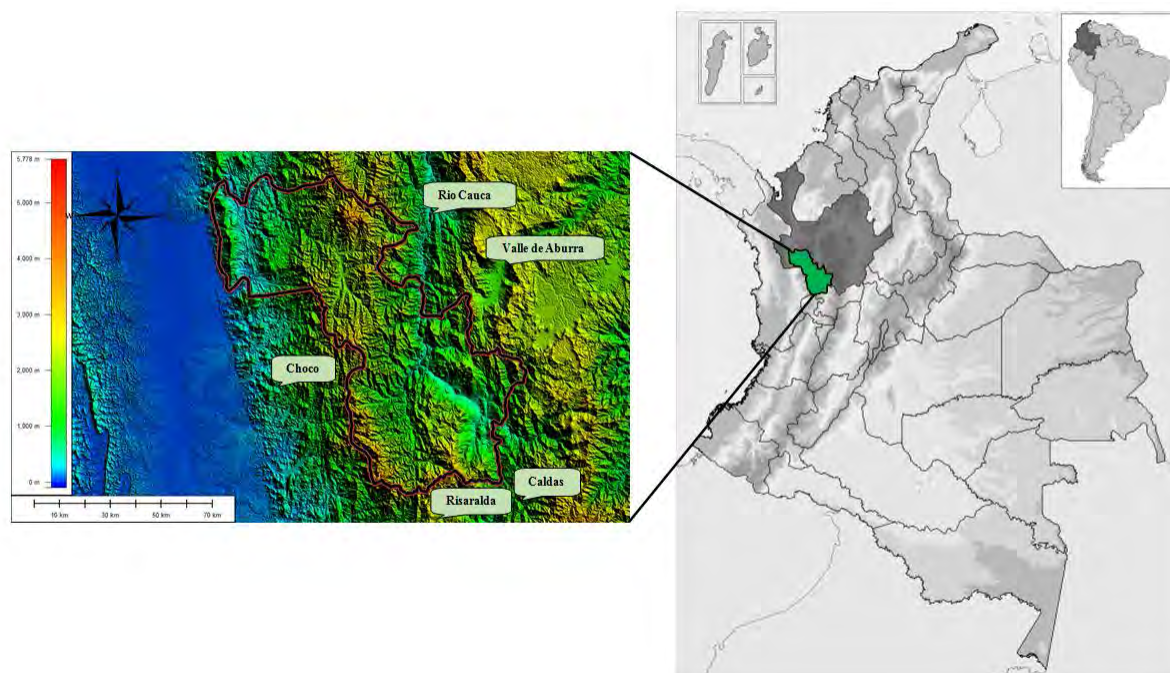


Figura 1. Localización de la zona de estudio,
Fuente: Modificado de [10]

territoriales, lo que supone un reto adicional para que este tipo de investigaciones tengan un impacto real en el territorio estudiado.

Para el departamento de Antioquia existen algunos trabajos puntuales [2–7] que realizan acercamientos específicos a las particularidades del patrimonio geológico de esta región, mientras que [8], han planteado una propuesta para la valoración del patrimonio geológico, que se ha aplicado al inventario de [9], para corroborar correspondencias en metodologías, encontrando una concordancia cercana al 70% entre ambos inventarios.

Este artículo presenta los resultados de un proyecto de investigación, cuyo objetivo general fue realizar un inventario de los sitios de interés geológico sobre cartografía escala 1:25.000 en el suroeste antioqueño (Fig. 1), conformado por 24 municipios y una población aproximada de 372.000 habitantes [10], logrando obtener datos para el análisis estadístico, relacionados con frecuencia, moda y tipología de los elementos incluidos en el inventario. Lo anterior para aportar en la construcción de una línea base de información, esencial para la valoración del patrimonio geológico de la región en etapas posteriores de la investigación.

Por su gran vocación ambiental y la calidad de los recursos naturales que poseen estos municipios, el patrimonio geológico se convierte en un recurso estratégico, que, al ser incorporado en la gestión ambiental dentro de los planes o esquemas de ordenamiento territorial, entran a ser parte del desarrollo local de la región y, por lo tanto, a contribuir en el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de la región, a través de las actividades de geoturismo [11].

2. Descripción zona de estudio

Existe un gran número de investigaciones geológicas en la zona de estudio, a escalas muy variadas y sobre temas diversos, entre las que se destacan: [12]–[16], entre otros.

La geología y los procesos geológicos actuales en el suroeste antioqueño, son producto de una larga y compleja historia de evolución geológica, donde la interacción de las placas tectónicas de Nazca, Suramérica y Caribe han jugado un papel preponderante, generando fallas y otras estructuras, vulcanismo, y una gran diversidad de rocas (Fig. 3). Todo ello modelado posteriormente por procesos geomorfológicos muy activos.

El río Cauca, que discurre por un imponente cañón atravesando la región, es la frontera natural de dos dominios geológicos diferentes, la Cordillera Central y la Oriental. El núcleo de la cordillera central está constituido por esquistos, gneises, cuarcitas y mármoles de edad paleozoica, a su vez instruidos por cuerpos graníticos de edad más reciente (cretáceos o cenozoicos), mientras que la cordillera occidental está conformada esencialmente por una secuencia vulcano-sedimentaria de origen marino y edades en su mayoría cretáceas [7,14].

En el fondo del cañón del río Cauca aparecen una serie de cuerpos intrusivos sub-volcánicos de edad cenozoica, asociados a volcanes cuyos remanentes se conservan en algunos cerros de gran valor paisajístico, como Cerro Tusa, Cerro Bravo, Farallones de La Pintada, de la formación Combia, entre otros (Fig. 2).



Figura 2. Panorámica general de los cerros Tusa y Sillón en jurisdicción del municipio de Venecia suroeste antioqueño, donde se muestra la gran diversidad paisajística y geomorfológica:

Fuente: Los autores

3. Metodología

La metodología aplicada, fue de tipo exploratorio, dado que los objetivos planteados, buscaban establecer línea base para esta zona del departamento.

Para tal fin, se desarrollaron actividades en torno a la adquisición, síntesis y análisis de información primaria (encuestas y talleres en colegios) y secundaria (revisión bibliográfica, centrada fundamentalmente en trabajos que destacaran aspectos geológicos en los municipios de la zona), actividades todas resumidas en orden consecuente en la Fig. 3.

Posteriormente la síntesis y análisis de la información recopilada en las dos fases anteriores, permitió tener un panorama claro de los déficits de información y tener de esta forma, una base para planificar la etapa posterior del trabajo de campo.

El trabajo de campo tuvo como objetivo principal completar la información faltante en algunos municipios de la zona, especialmente en el municipio de Caicedo y poner a prueba dentro de la metodología, un taller sobre patrimonio geológico diseñado para estudiantes de 10° y 11° grado de bachillerato, de modo que se pudiera indagar sobre el concepto de patrimonio geológico y el reconocimiento de este en su territorio.

Posterior al trabajo de campo, se realizó una segunda integración y análisis de toda la información, concluyendo con 168 bienes de interés geológico identificados para los cuales se realizó un análisis estadístico, de frecuencia, moda y tipología.

4. Resultados y Discusión

Existe un gran número de investigaciones geológicas relacionadas con temas y escalas muy variadas en la zona de estudio, entre los que se destacan: [12]–[17], entre otros.

La geología y los procesos geológicos actuales en el suroeste antioqueño, son producto de una larga y compleja historia de evolución geológica, donde la interacción de las placas tectónicas de Nazca, Suramérica y Caribe han jugado un papel preponderante, generando fallas, vulcanismo, una gran diversidad de rocas y procesos geomorfológicos (Ver Fig. 4).

El río Cauca que discurre por un imponente cañón atravesando la región, es la frontera natural de dos dominios geológicos totalmente contrastantes: un dominio oceánico en las rocas de la cordillera occidental y un dominio continental en las rocas de la cordillera central.

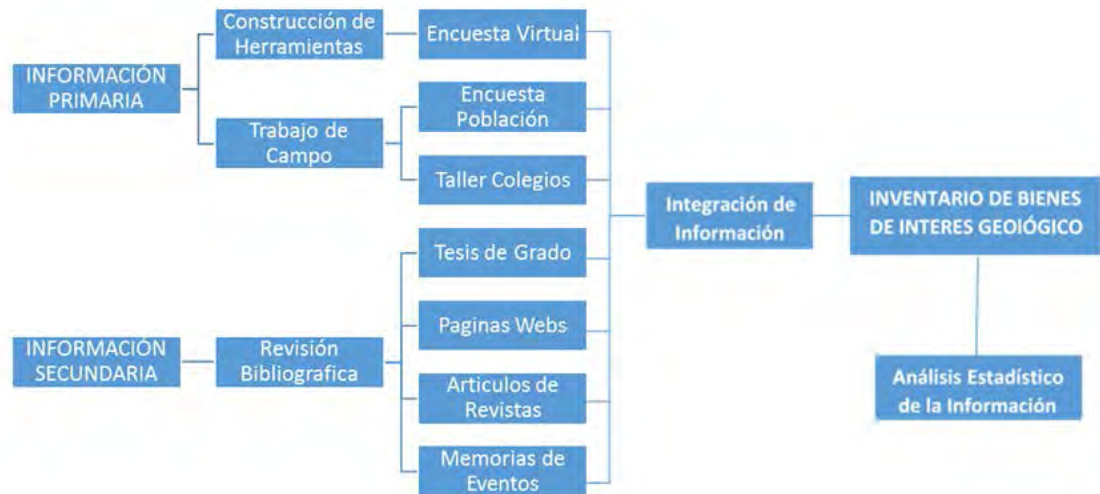


Figura 3: Proceso metodológico seguido para el desarrollo del trabajo
Fuente: Los autores

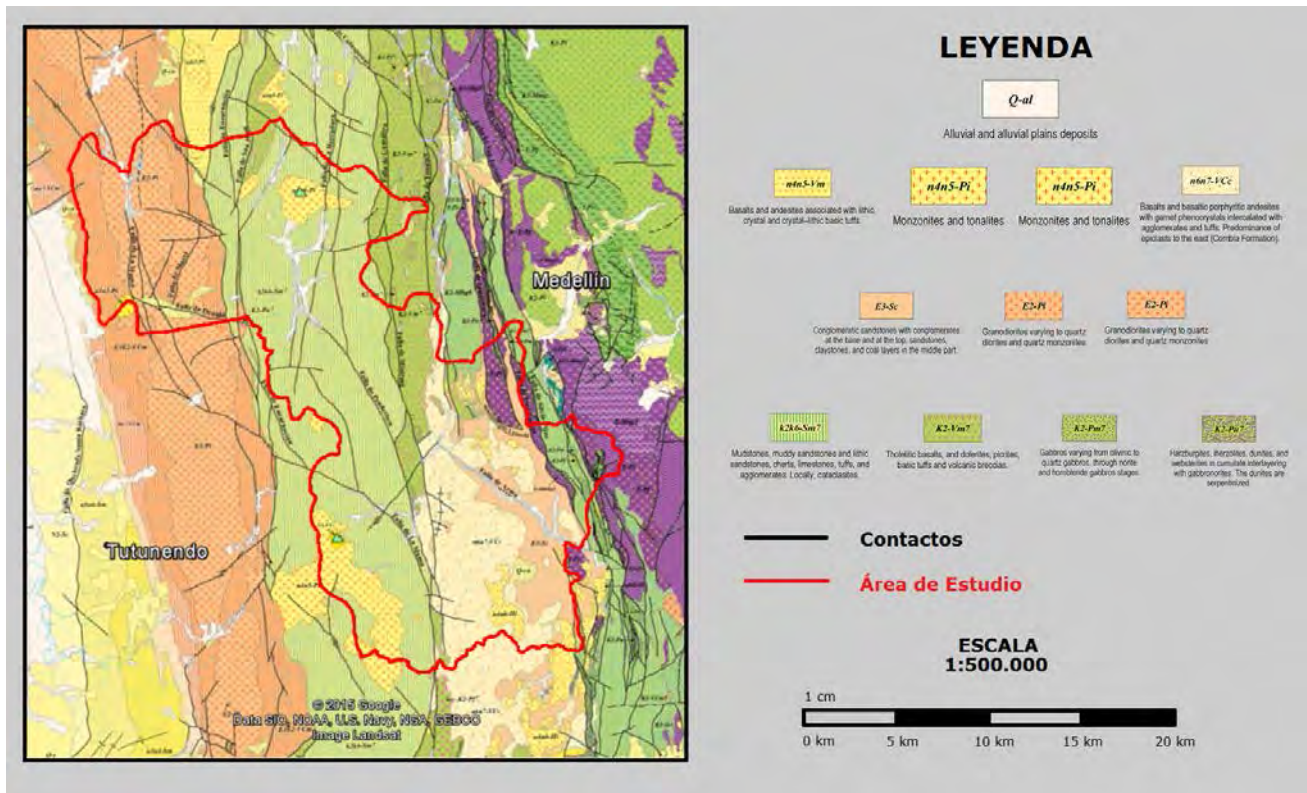


Figura 4: Mapa geológico de la zona.
Fuente: Modificado de [18]

El núcleo de la cordillera central está conformado por esquistos, gneises, cuarcitas y mármoles de edad paleozoica a su vez instruidos por cuerpos graníticos de edad más reciente (cretáceos o cenozoicos), mientras que la cordillera occidental está conformada esencialmente por una secuencia vulcano-sedimentaria de origen marino y edades en su mayoría cretáceas.

En el fondo del cañón del río Cauca, aparecen una serie de cuerpos intrusivos. Sub-volcánicos de edad cenozoica, asociada a volcanes ya extintos y cuyos remanentes se conservan en esos cerros de gran valor paisajístico como Cerro Tusa, Cerro Bravo, Farallones de La Pintada entre otros, de la formación Combia.

Asociado a este conjunto complejo de rocas ígneas y metamórficas aparecen rocas sedimentarias, cuyo exponente más representativo es la formación Amaga, responsable de la riqueza carbonífera de la región y sedimentos recientes (cuaternarios), producto de la dinámica actual muy condicionada por el clima y las intervenciones antrópicas.

Todo el contexto geológico anteriormente descrito, se encuentra enmarcado dentro de un conjunto de fallas muy importantes en el país, denominado sistema de fallas Cauca-Romeral, producto de la interacción tectónica y que actualmente se encuentra activo. Adicional a lo anterior, toda esta geodinámica

asociada a los cambios climáticos que han ocurrido durante toda la historia de la región han generado un paisaje contrastante conformado por el cañón del río Cauca, escarpes como el de Jericó-Támesis, la meseta de Jericó, los cerros de altas pendientes representados en Cerro Tusa, Cerro Bravo, Los Farallones de La pintada, entre otros y una importante red hídrica con corrientes de carácter torrencial como los ríos Tapartó, Cartama, Poblano, Sinifaná, entre otros, configurándose una gran diversidad paisajística que actualmente se convierte en un recurso ambiental importante para la región.

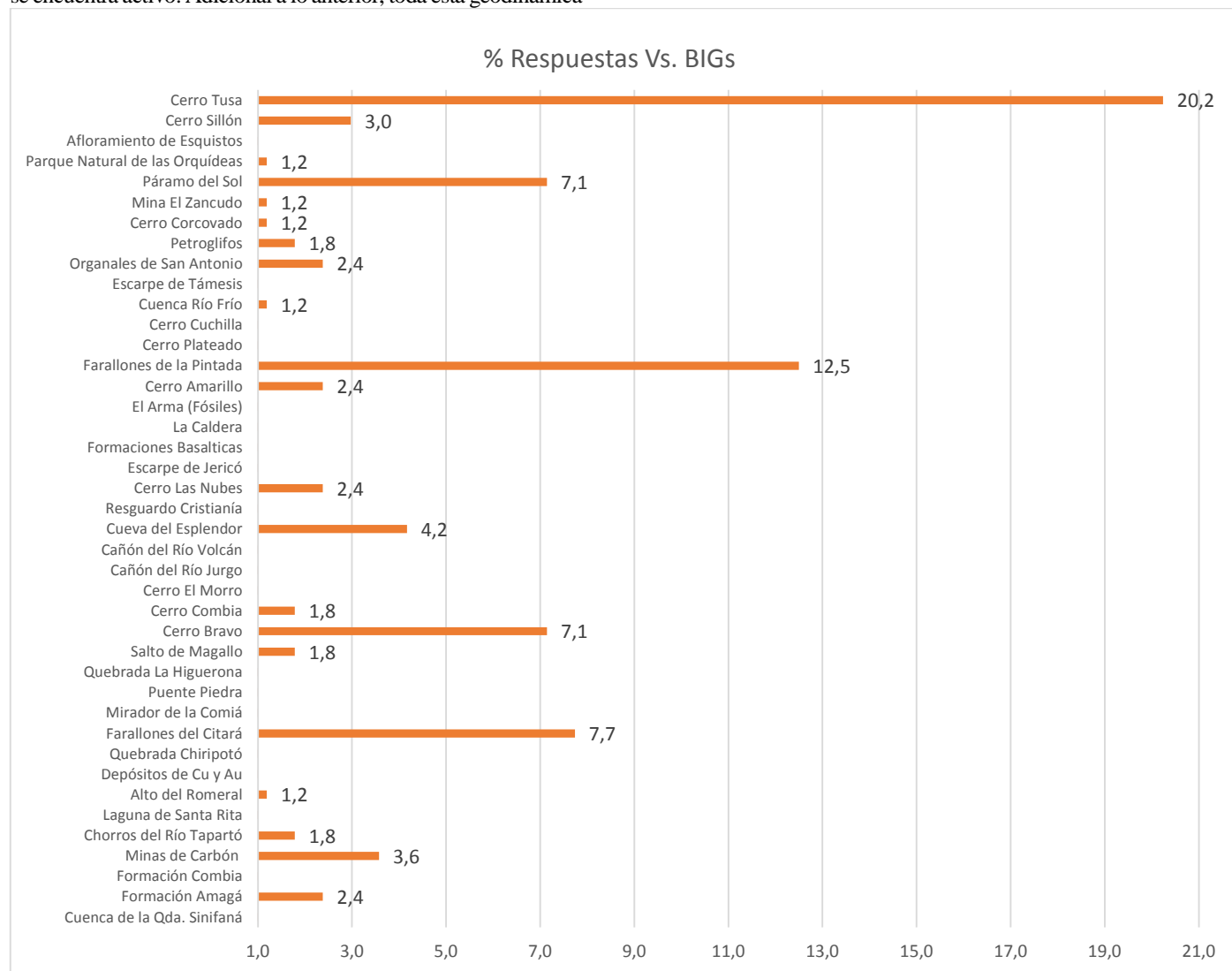


Figura 5. Resultado del análisis de la moda para los sitios con más reconocimiento en el imaginario de la población, como puntos/sitios de interés geológico o ambiental o bienes de interés geológico (BIGs), según la nueva normatividad que cursa en el congreso “por el cual se regula la gestión integral del patrimonio geológico y paleontológico de la Nación y se reglamenta la Ley 45 de 1983.”.

Fuente: Los autores

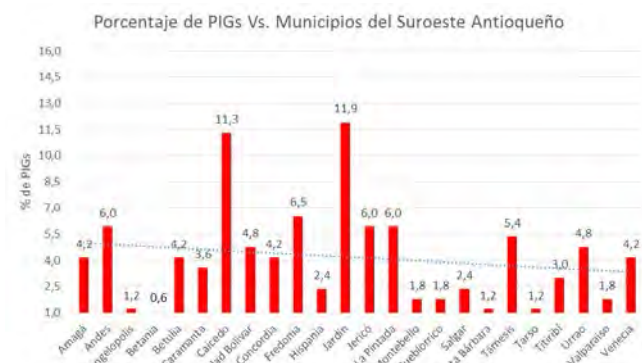


Figura 6. Frecuencia de los puntos de interés geológico por municipio en el suroeste antioqueño

Fuente: Los autores

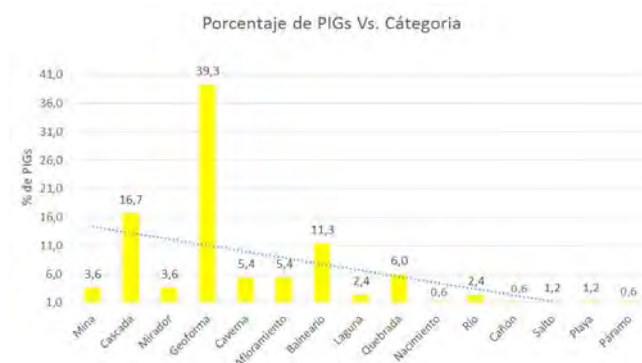


Figura 8. Distribución por categorías de los puntos de interés geológico en el suroeste antioqueño

Fuente: Los autores

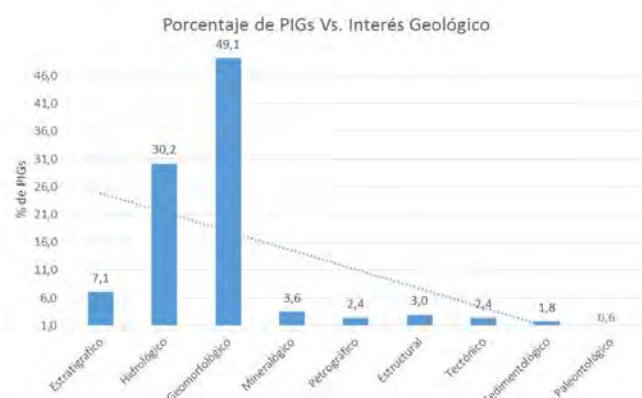


Figura 7. Distribución por interés geológico de los puntos de interés geológico en el suroeste antioqueño

Fuente: Los autores

El primer análisis realizado, permite poner en evidencia los sitios con más reconocimiento en el imaginario de la población, ya sea por su valor natural/ambiental y/o cultural destacándose Cerro Tusa (20,2%), Farallones de la Pintada (12,5%), Los Farallones de Citará (7,7%), El Páramo del Sol (7,1%) y Cerro Bravo (7,1%). Es importante destacar en el análisis de la moda, que existen algunos puntos sólo reconocidos por los expertos por su gran valor científico, pero sin reconocimiento en el imaginario de la población (ver Fig. 5).

Con respecto a la frecuencia o cantidad de sitios reportados por municipio se deduce de la fig. 6, que los municipios con mayor número de sitios de interés geológico son en su respectivo orden: Jardín (11,9%), Caicedo (11,3%); Andes, Jericó y La Pintada (6,0%), siendo Betania el único municipio donde solo se reporta un sitio.

Por otra parte, el análisis de la muestra global según la categoría geológica del sitio o punto de interés geológico (Fig. 7) muestra que hay un predominio de las categorías geomorfológico (49,1%), hidrológico (30,4%) y estratigráfico (6,5%).

Por otro lado, en la Fig. 8, se observan los porcentajes de las diferentes categorías de los puntos de interés geológico inventariados, destacándose las geoformas (39,3 %), lo cual es consecuente con el tipo de interés geológico descrito en porcentajes en la fig. 7, seguido de las cascadas (16,7 %) y de los balnearios (11,3 %), este último incorporado, solo por su origen natural.

Finalmente, cabe destacar que las minas entraron en el levantamiento de información como puntos de interés geológico con un porcentaje de 3,6%, pero estas fueron seleccionadas por las características geológicas de la mineralización, con su respectivo valor a la economía departamental y su reconocimiento a nivel nacional.

5. Conclusiones

El paisaje como síntesis de la gran diversidad geológica, geomorfológica y climática existente en el suroeste antioqueño, es un recurso ambiental estratégico, para generar un desarrollo económico local alternativo centrado en el turismo de naturaleza, donde el geo-turismo puede jugar un papel muy importante.

La realización de un inventario y valoración del patrimonio geológico en el suroeste antioqueño con metodologías avaladas por la autoridad nacional encargada (Servicio Geológico Colombiano) y con una participación de todos los sectores sociales, es una necesidad en el corto plazo, que permita tener una información sistematizada y confiable, como base para incorporar el patrimonio geológico como un recurso en los planes de ordenamiento territorial y gestión ambiental en la región.

Debido a que los grandes proyectos de infraestructura o minería, generan un gran impacto ambiental en el paisaje, es necesario incorporar dentro de los estudios de impacto ambiental una valoración de este recurso, su afectación y su

respectivo plan de manejo, que permita prevenir y compensar las afectaciones causadas.

Así mismo, es necesario efectuar análisis similares en sectores naturales que están actualmente siendo explotados por el turismo (de naturaleza y de aventura), de modo que se definan lineamientos para su uso adecuado y su conservación en el tiempo.

El tema del patrimonio geológico, su definición, identificación, valoración, preservación y uso dentro de los postulados del desarrollo sostenible, debe ser incorporado como contenido dentro de las asignaturas de los currículos escolares de ciencias naturales y geografía, en las escuelas y colegios de la región.

En los procesos de capacitación no formal dirigidos a la comunidad en general, que adelanten las entidades públicas y privadas en la región, relacionadas con el medio ambiente, es muy importante incorporar el tema del patrimonio geológico, con el fin de ir generando una base social, capacitada para reconocer, valorar, preservar y gestionar este recurso.

Los municipios deben adelantar un inventario y valoración de su patrimonio geológico con la participación de todos los sectores sociales, que les permita adelantar proyectos estratégicos, como por ejemplo adquirir predios con valor patrimonial y poder adelantar allí, proyectos de gran impacto social. Un ejemplo de esto es la necesidad prioritaria que el municipio de Venecia adquiera los predios correspondientes al Cerro Tusa, para poder desarrollar allí un proyecto turístico de gran impacto en la economía municipal.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los estudiantes, María Gabriela Sándigo, Sara Vanessa Ramírez, Juan Esteban Quintero y Lina Cifuentes integrantes del Grupo de investigación en Geología Ambiental GEA, por su valiosa colaboración en el trabajo de campo, recopilación de la información en las páginas webs entre otras.

Igualmente, extendemos nuestros agradecimientos a la oficina de investigación y extensión de la facultad por la financiación dada a este proyecto.

Bibliografía

- [1] Prosser, C.D., Brown, E.J., Larwood, J.G. and Bridgland, D.R., Geoconservation for science and society - An agenda for the future, *Proc. Geol. Assoc.*, 124(4), 2013.
- [2] Cárdenas, G. y Restrepo, C., Patrimonio geológico y patrimonio minero de la cuenca carbonífera del suroeste antioqueño, Colombia, *Boletín Ciencias de la Tierra*, 18, pp. 91-102, 2006.
- [3] Henao, A., Osorio, J. y Hurtado, E., Propuesta para la divulgación del patrimonio geológico del departamento de Antioquia, Colombia. XIV Congreso Latinoamericano de Geología y XIII Congreso Colombiano de Geología, pp. 312-313, 2011.
- [4] Molina, J. y Torres, H., (). Aproximación al patrimonio geológico y geodiversidad en Santafé de Antioquia, Olaya y Sopetrán, departamento de Antioquia, Colombia. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 2012. Available at: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/tbct/article/view/37201/43371>.
- [5] Osorio, J. y Henao, A. (2012). Propuesta para la divulgación del inventario de reconocimiento del patrimonio geológico del departamento de Antioquia - Colombia caso aplicativo. Congreso Latinoamericano de Prevención de Riesgos y Medio Ambiente, Santiago de Chile-Chile. Available at: http://paritario.atalca.cl/docs/MESA_A_PONENCIAS/A_19_Propuesta_Divulgacion_Inventario_Patrimonio_Geologico_Antioquia_COLOMBIA_OSORIO_HENAO.pdf
- [6] Jaramillo, E., Caballero, J. y Molina, J., Patrimonio geológico y geodiversidad: Bases para su definición en la zona andina de Colombia: caso Santa Fe de Antioquia. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 35, pp. 53-66, 2014.
- [7] Caballero, J., Rendón, A., Gallego, J. and Uasapud, N., Inter-Andean Cauca river canyon. In *landscapes and land forms of Colombia*. Springer, pp. 155-166, 2015.
- [8] Rendón, A., Henao, A. y Osorio, J., Propuesta metodológica para la valoración del patrimonio geológico, como base para su gestión en el departamento de Antioquia. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 33, pp. 85-92, 2013.
- [9] Henao, A. y Osorio, J., Propuesta Metodológica para la identificación y clasificación del patrimonio geológico como herramienta de conservación y valoración ambiental. Congreso Latinoamericano de Prevención de Riesgos y Medio Ambiente. 2012. Available at: http://congresopryma.blogutem.cl/files/2012/12/A_11_Propuesta_Metodologica_Clasific_Patrimonio_Geolog_HENAO_OSORIO.pdf
- [10] Gobernación de Antioquia. Perfil de la subregión del suroeste - Departamento Administrativo de Planeación. Medellín. 2009, 152 P.
- [11] Grose, E., (1926). El terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia entre el río Arma y Sacojal (Verlag Von). Verlag Von Dietrich Reimer (Ernst Vohsen). 362 P. Disponible en: <http://www.accefyn.org.co/cientificos/pdf/emilGrosse/EmilGrosse.pdf>
- [12] Page, W., Seismic geology and seismicity of northwestern Colombia. woodward-clyde consultants, ISA. 1986, 156 P.
- [13] MacDonald, W., Estrada, J., Sierra, G. and González, H., Late Cenozoic tectonics and Paleomagnetism of north Cauca basin intrusions, Colombian Andes: Dual rotation models, 261(4), pp. 277-289, 1997.
- [14] Taboada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H. and Rivera, C., Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5), pp.787-813, 2000.
- [15] González, H. Mapa geológico del Departamento de Antioquia (Memoria explicativa). *Boletín Geológico. Ingeominas*, 2001, 240 P.
- [16] Monsalve, H. y Mora, H. Esquema geodinámico regional para el noroccidente de Suramérica (Modelo de subducción y desplazamientos relativos). *Boletín de Geología*, 27(44), pp. 25-63, 2005.
- [17] Gómez, J., Montes, N.E., Nivia, A. y Diederix, H., compiladores. Atlas Geológico de Colombia. Escala 1:500 000. Servicio Geológico Colombiano, 26 planchas, Bogotá, 2015.

A. Rendón-Rivera, es Ing. Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia en 1991, MSc en Desastres de la Universidad de Antioquia en 1998, PhD en Ciencias de la Tierra de la Universitat de Barcelona en 2005. Actualmente profesor asociado Universidad Nacional de Colombia – Medellín desde el año 2007. Los temas de interés son: Neotectónica, paleosismología, gestión de riesgos, ordenamiento territorial y patrimonio geológico.
ORCID: 0000-0002-3817-3957

A.M. Henao-Arroyave, Ing., Geológica, de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Los temas de interés incluyen: Geología ambiental, patrimonio geológico, geomorfología, ordenamiento territorial, gestión del riesgo y combustibles fósiles y alternativos.
ORCID: 0000-0002-3842-5229

J.G. Osorio-Cachaya, Ing., Geológica, de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Los temas de interés incluyen: Caracterización mineralógica, geología ambiental, patrimonio geológico y gestión del riesgo.
ORCID: 0000-0002-5287-2965

Tomography axial computerized technique application to improve Cuban oil fields seal and reservoir rocks characterization

Lisset Miquel-González, Gilbert Ortiz-Rabell & Olga Castro-Castiñeira

CEINPET, La Habana, Cuba. lisset@ceinpet.cupet.cu, gilbert@ceinpet.cupet.cu, olgac@ceinpet.cupet.cu

Received: January 08th, 2016. Received in revised form: August 1st, 2016. Accepted: December 15th, 2016.

Abstract

This investigation pretend to obtain improve on seal and reservoir rocks composition studies in oil fields, more certain in the formations characterization, and to prove the necessity of analytical nuclear techniques' incorporation to petrophysical methods' complex used in the Cuban oil prospection. This investigation used computer axial tomography method in consolidated cores' rock and free software Image J as tomography interpretation support, resulting in novel improvement to the petrophysical laboratory. The following results were obtained: the computer axial tomography on cores' rock were carried out; the resulted images were analyzed in quantitative and qualitative way, using Image J software, obtaining a good correlation with expert's description of those cores' rock. A methodology which permit to find average porosity and density values per pixel using tomography images were obtained, with the necessary corrections per lithology. This methodology is now in the initial phase of its development.

Keywords: nuclear techniques, computer axial tomography, porosity and composition, cores' rock.

Aplicación de la técnica de tomografía axial computarizada para mejorar la caracterización de las rocas sello y reservorio de los yacimientos petroleros cubanos

Resumen

Con este trabajo se pretende obtener mejoras en el estudio de la composición y porosidad de las rocas sello y reservorio presentes en los yacimientos petroleros, de lo que se deriva una mayor certeza en la caracterización de las formaciones a las que pertenecen, además de demostrar la necesidad de incorporar plenamente las técnicas nucleares analíticas al complejo de métodos petrofísicos que se utiliza en la prospección de petróleo en Cuba. Para este estudio se utilizó el método de tomografía axial computarizada en núcleos consolidados y *software* libre *ImageJ* como apoyo en la interpretación de las imágenes tomográficas, lo que resulta un aporte novedoso a la petrofísica de laboratorio. La investigación obtuvo los siguientes resultados: Se realizaron las mediciones de tomografía axial computarizada a núcleos; se analizaron cualitativa y cuantitativamente las imágenes resultantes, con ayuda del *software ImageJ* obteniendo una buena correlación con las descripciones de dichos núcleos por expertos. Se obtuvo una metodología que permite hallar la densidad y la porosidad media en cada punto (*pixel*) a partir de dichas imágenes, con las correcciones necesarias por litología. Esta metodología se encuentra en la fase inicial de su desarrollo.

Palabras clave: Técnicas nucleares, tomografía axial computarizada, composición y porosidad, núcleos.

1. Introducción

Las mediciones petrofísicas de laboratorio sirven para fundamentar la interpretación de los métodos geofísicos de pozo y esto tiene cierta vinculación con la efectividad de las

investigaciones y los resultados de producción en los pozos. Siguiendo diferentes métodos y metodologías, dicha correlación se utiliza en primer lugar para fundamentar la interpretación de las mediciones en el pozo, que también han alcanzado gran desarrollo en la actualidad, teniendo gran

How to cite: Miquel-González, L., Ortiz-Rabell, G. & Castro-Castiñeira, O., Aplicación de la técnica de tomografía axial computarizada para mejorar la caracterización de las rocas sello y reservorio de los yacimientos petroleros cubanos. Boletín de Ciencias de la Tierra, (41), 73-80, 2017.

aceptación, por su precisión, los métodos radiactivos y nucleares, representados por los métodos neutrónicos y el método de litodensidad, utilizados para determinar la litología y la porosidad de las rocas.

El Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET) de Cuba ha realizado un arduo trabajo intentando incluir los métodos nucleares de laboratorio en las investigaciones de pozo. Ejemplo de ello es la aplicación del método de Espectrometría Gamma de Bajo Fondo en la caracterización de las rocas sello y reservorio [3], además de investigaciones sobre la utilización de la Resonancia Magnética Nuclear, tanto en laboratorio como *in situ*, en la exploración petrolera mundial. El método de Tomografía Axial Computarizada (TAC) se aplicó por primera vez en el CEINPET como parte de esta investigación en laboratorios que cuentan con el equipamiento necesario, los que se encuentran fuera del sector petrolero (en el sector de la salud), lo cual impuso un rigor a este trabajo y la necesidad de conocer bien los procedimientos y metodologías que son necesarias para obtener resultados confiables.

2. Materiales y métodos

2.1. Pozos en los cuales se realizaron estudios

En la Tabla 1 se recogen los pozos utilizados en el estudio y su litología principal.

2.2. Descripción de los núcleos utilizados

En la selección de pozos se tuvo en cuenta la variedad litológica, así como la distribución de densidades presente. Por lo que, las muestras tomadas (núcleos consolidados), son representativas de los sellos y reservorios de los yacimientos cubanos.

Para el estudio cualitativo se consultaron las descripciones de los expertos de cada pozo de estudio, localizando los datos referentes al intervalo donde se extrajeron los núcleos analizados.

2.3. Descripción del método de Tomografía Axial Computarizada (TAC)

El método requiere de un tomógrafo, el cual utiliza una carcasa rotativa en la que se instala un tubo de rayos X frente a un conjunto de detectores. La muestra se ubica en el centro de la carcasa, mientras la fuente de rayos X y los detectores

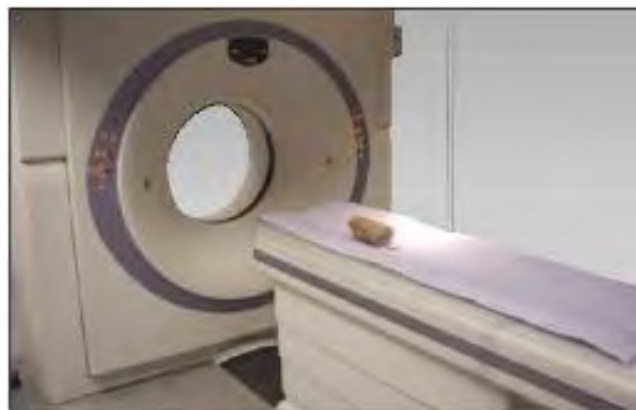


Figura 1. Medición de núcleo de roca en tomógrafo médico. Fuente: [8].

opuestos rotan alrededor del mismo. Con la muestra ubicada aproximadamente en el centro del plano fuente-receptor, la carcasa rotativa permite obtener una serie de barridos radiográficos estrechamente espaciados desde múltiples ángulos. Estos estudios, o proyecciones radiográficas, luego pueden procesarse para obtener una representación 3D de la muestra [3]. Las proyecciones radiográficas de Tomografía Axial Computarizada (TAC) dependen de la atenuación diferencial de los rayos X causada por los contrastes de densidad presentes en la muestras testigos. Esta atenuación representa una reducción de la energía conforme los rayos X atraviesan las diferentes partes de las muestras. En dependencia de la composición de la muestra se dispersan o absorben mejor los rayos X, es decir donde mayor densidad haya más rayos X absorberá (matriz rocosa) y donde menos densidad haya los rayos X pasaran más hacia los detectores (matriz porosa, fluidos), siendo la atenuación una función de la energía de los rayos X y de la densidad y el número atómico de los elementos a través de los cuales pasan. La correlación es bastante directa: los rayos que poseen menos energía, las mayores densidades y los números atómicos más altos generalmente se traducen en mayor atenuación [3].

El método de la TAC (Fig. 1), se puede resumir en cuatro sencillos pasos:

- Producción de los Rayos X.
- Adquisición de datos.
- Reconstrucción de la imagen.
- Despliegue de la imagen.

El principio se basa en la atenuación de la radiación al atravesar la materia, la cual depende de la Absorción Fotoeléctrica y el Efecto Compton.

Aplicando este principio a la determinación de propiedades petrofísicas es posible obtener aproximaciones a éstas de tipo cualitativo y de tipo cuantitativo. Las primeras pueden usarse para el análisis de densidad y detección de fracturas basados en el principio de que el coeficiente de atenuación es directamente proporcional a la densidad. La cuantificación de las propiedades petrofísicas se logra a partir de la determinación de los números HU de la región de interés. Esta información puede ser almacenada en forma digital [4].

Tabla 1.

Pozos utilizados y su litología principal.

Área	Pozo	Litología
Franja Norte de Crudos Pesados	VI	Caliza arrecifal
	VII	Gabro
	VIII	Caliza Arcillosa
	IX	Caliza
	X	Caliza
	XI	Caliza
	XII	Caliza
	XIII	Arcosa
	XIV	Arcilla

Fuente: Adaptado de [3]

2.4. Cálculo de porosidad a partir de la densidad

Si se toma una roca porosa, no es difícil suponer que la densidad de la misma se relaciona con la densidad de la matriz y con su capacidad poral. Esto se relaciona según la siguiente ecuación [8]:

$$\phi = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m - \rho_f} \quad (1)$$

donde:

ρ_m = densidad de la matriz (debe conocerse)

ρ_b = densidad obtenida por TAC

ρ_f = densidad del fluido en los poros

En esta expresión si el fluido es aire con densidad cercana a 0, puede eliminarse el término ρ_f .

2.5. Programa utilizado: Visualizador de imágenes ImageJ

El programa utilizado para procesar las imágenes de TAC realizadas a núcleos testigos cortados en yacimientos petroleros cubanos, con una geometría cilíndrica, es el *ImageJ*. Con esta herramienta se pueden hacer operaciones muy sencillas sobre imágenes como ajustar el contraste, transformar una imagen aplicándole diferentes tipos de filtros; además se puede utilizar *ImageJ* para efectuar operaciones más sofisticadas sobre las imágenes como por ejemplo resaltar algunos detalles y ocultar otros. En particular, se utiliza el *ImageJ* para visualizar las estructuras internas de los núcleos [5].

Una imagen en blanco y negro, es un arreglo rectangular de puntos (píxeles) a cada uno de los cuales se le asigna un número entre 0 y 255. El valor 0 representa el negro y el valor 255 representa el blanco. Los números comprendidos entre 0 y 255 representan lo que se conoce como una escala de grises. Así las zonas oscuras de una imagen estarán representadas por píxeles con valores cercanos a 0 mientras que las zonas muy claras con píxeles cercanos a 255. Es decir que, formalmente, una imagen en blanco y negro no difiere de una matriz. Cada elemento de la matriz representa un punto de la imagen y el valor de dicho punto es la intensidad que tiene la imagen en ese punto [5].

En la ventana principal del visualizador *ImageJ* se muestra la barra de trabajo que se compone de varios menús y algunos botones (Fig. 2). Para el análisis solo se utilizan algunos de los comandos que brinda el programa.



Figura 2. Barra de trabajo del *ImageJ*.

Fuente: [3]

2.5. Método para analizar las imágenes tomográficas utilizando el programa *ImageJ*

Se muestra en forma de secuencia de pasos a partir de obtener las imágenes.

1. Realizar la unión secuencial de las imágenes (*stack*) según los pasos reflejados en la Fig. 3.

Quedando la secuencia de imágenes, en la cual al desplazarse por la barra inferior se pueden observar todas las imágenes una a continuación de la otra, como se muestra en la Fig. 4.

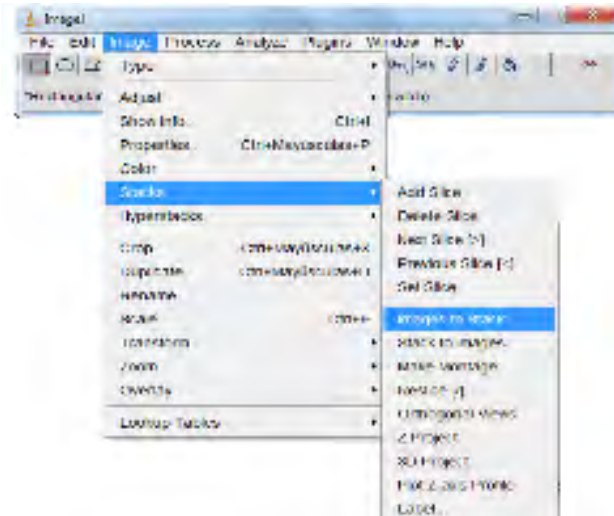


Figura 3. Muestra una de las vías para visualizar un set de imágenes completo.

Fuente: [3]

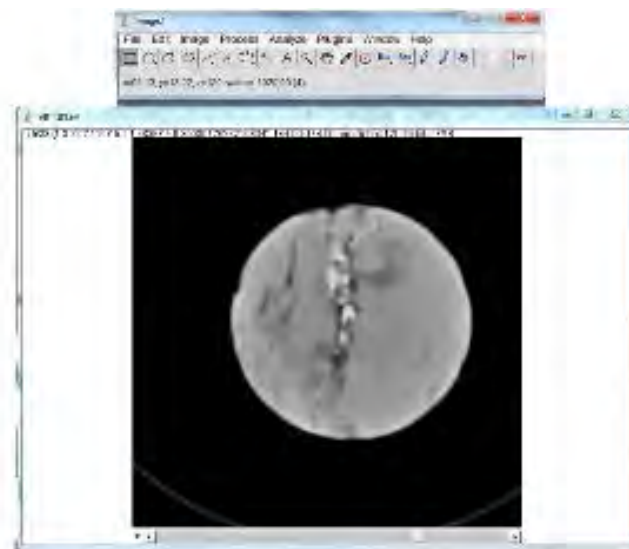


Figura 4. Muestra una imagen de la secuencia de imágenes de uno de los núcleos estudiados.

Fuente: [3]

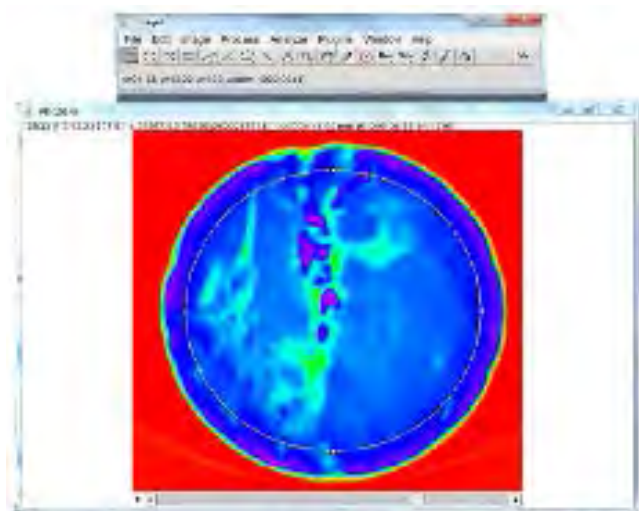


Figura 5. Muestra *stack* de uno de los núcleos estudiados al cual se le aplicó el filtro *spectrum*.
Fuente: [3]

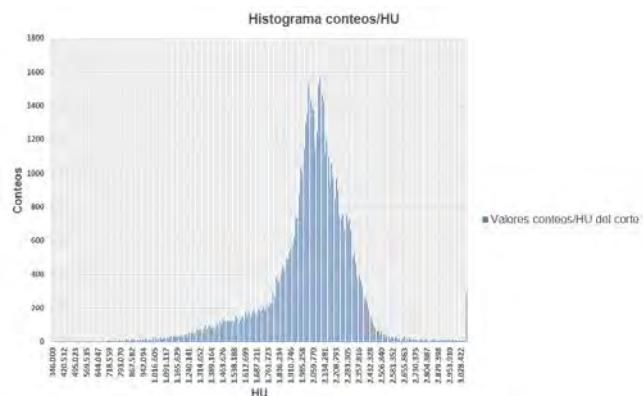


Figura 6. Histograma obtenido a partir del corte mostrado en la Figura 5.
Fuente: [3]

2. Con el menú Image nuevamente, esta vez con la opción Adjust, seleccionar Color Balance.
3. Visualizar los núcleos utilizando diferentes filtros, lo que posibilita resaltar zonas de interés, como se muestra en la Fig. 5.
4. Utilizar el botón de selección de área más conveniente según la imagen, revisar que solo quede seleccionada la roca y no los bordes que pueden contener valores ficticios o erróneos (Fig. 5).
5. Utilizar el menú Analyze, seleccionar la opción Histogram para obtener un histograma de la variación del HU en toda la imagen (Fig. 6).
6. Repetir los pasos 6 y 7 en cada imagen de la secuencia obteniendo todos los valores de HU a lo largo del núcleo estudiado.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados cualitativos del trabajo realizado con las imágenes obtenidas del TAC

Se pudieron observar claramente cavernas, vóculos y fracturas en las imágenes de TAC utilizando el equipo médico común (Figs. 7-15). Luego fue factible hacer un análisis de las características de los diferentes núcleos estudiados en comparación con las descripciones de los expertos. Las imágenes mostradas a continuación están conformadas en una escala de grises, donde los grises más oscuros se corresponden con la porosidad y los grises más brillantes con las litologías más densas.

Pozo VI - Descripción de expertos: Se manifiesta como una conglobrecha compuesta por fragmentos de naturaleza arrecifal, dolomitizada por sectores. Presenta porosidad vugular abundante.

Pozo VII - Descripción de expertos: Núcleo constituido por litología uniforme de gabra caracterizado por la textura granular y abundante presencia de fracturas. Presenta varios sistemas de fracturas que se orientan en diferentes direcciones. Abundante presencia de fracturas parcialmente selladas por minerales de carácter secundarios carbonatados.

Para esta roca ígnea la porosidad generalmente es secundaria debida a fracturas por tectónica.

Pozo VI

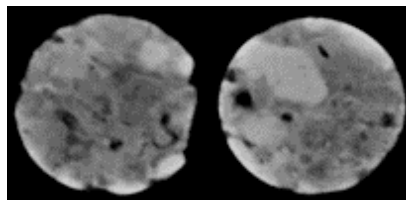


Figura 7. Imágenes de TAC del núcleo de caliza arrecifal del pozo VI.
Fuente: [3]

Pozo VII

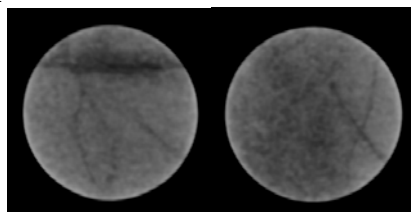


Figura 8. Imágenes de TAC del núcleo de gabra del pozo VII.
Fuente: [3]

Pozo VIII

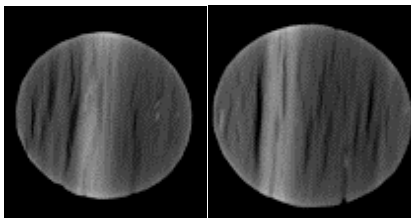


Figura 9. Imágenes de TAC del núcleo de caliza arcillosa del pozo VIII.
Fuente: [3]

Pozo IX

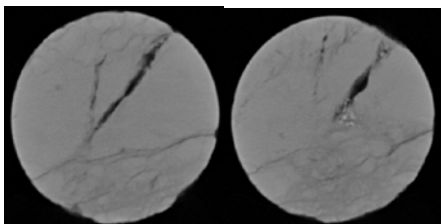


Figura 10. Imágenes de TAC del núcleo de caliza del pozo IX.
Fuente: [3]

Pozo X

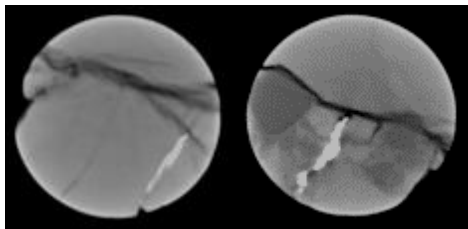


Figura 11. Imágenes de TAC del núcleo de caliza del pozo X.
Fuente: [3]

Pozo VIII - Descripción de expertos: Núcleo de caliza arcillosa con matriz escasa e impregnada de abundantes microcapillas orientadas según la deposición. Fracturas finas en las juntas de disolución rellenas con calcita, parcialmente vacías, y con petróleo.

En las arcillas la porosidad es en forma de juntas de disolución rellenas fundamentalmente de petróleo, materia orgánica, o minerales arcillosos.

Pozo IX - Descripción de expertos: Núcleo de caliza con matriz arcillosa. Abundantes fracturas en diferentes direcciones, algunas rellenas con calcita. Presencia de fracturas posteriores a la extracción. Presencia de petróleo oxidado en las fracturas. Se ven fracturas con cavernas por lixiviación.

En la Fig. 10 se muestra la presencia de fracturas posteriores a la extracción, característica de las matrices arcillosas, pues la arcilla que se encuentra comprimida, se seca al salir a la superficie. Este proceso provoca fracturas.

También en esta figura se muestran fracturas con cavernas, las cuales son formadas por el proceso de lixiviación. Este, no es más que la apertura de cavernas y el sellado de las fracturas por el paso del agua, que muchas veces arrastra consigo minerales como la calcita.

Pozo X - Descripción de expertos: Núcleo de calcilita organógena con impregnación de bitumen en microestilolitos. Cavernosidad distribuida por la roca. Contenido arcilloso con calizas fragmentarias.

La porosidad por fracturas debidas fundamentalmente a la tectónica o a procesos de disolución es característica de los carbonatos.

Pozo XI - Descripción de los expertos: Núcleo constituido por caliza pelitomórfica. Con abundantes brechas con fragmentos unidos por sustancia bituminosa a modo de un cemento en los contactos y los poros. Fracturas dispersas bien abiertas por lixiviación. Muestra abundante impregnación de petróleo.

Abundantes cristales de caliza. Presenta microfracturas, fracturas y estilolitos.

Pozo XII - Descripción de los expertos: Núcleo constituido por una litología uniforme de caliza. Se observan finas capillas de caliza bituminosas. Se observa una fuerte fragmentación a veces hasta el brechamiento, con dislocación manifestadas de las partes. La fracturación dispersa se orienta, a veces paralela a las capillas y otras perpendiculares a estas. Las fracturas están agrandadas por lixiviación y vórgulos.

Las imágenes muestran las interconexiones entre fracturas y vórgulos que conforman la porosidad característica de estas rocas recrystalizadas.

Pozo XIII - Descripción de los expertos: Los dos núcleos están formados por conglomerados arcóscicos y arcosa de grano medio a muy grueso. Se aprecia un fuerte grado de dislocación manifestado por la presencia de fracturas abiertas que cortan el eje del núcleo en varias direcciones. Se aprecian también numerosas fracturas finas de diferentes dimensiones y direcciones, en algunos casos, claramente rellenas por cuarzo microcristalino. El grado de impregnación es fuerte, relacionado en gran medida con las superficies de las numerosas fracturas abiertas.

Pozo XI

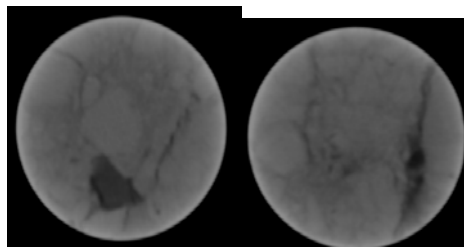


Figura 12. Imágenes de TAC del núcleo de caliza del pozo X.
Fuente: [3]

Pozo XII

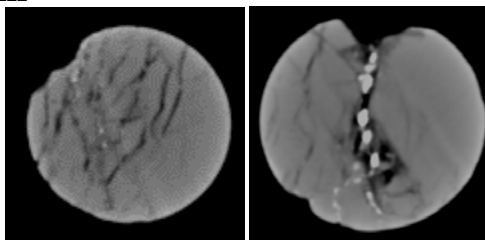


Figura 13. Imágenes de TAC del núcleo de caliza del pozo XII.
Fuente: [3]

Pozo XIII

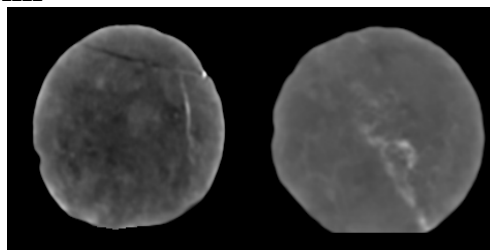


Figura 14. Imágenes de TAC de los núcleos de arcosa del pozo XIII.
Fuente: [3]

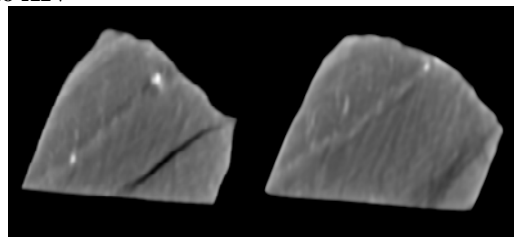
Pozo XIV

Figura 15. Imágenes de TAC del núcleo de arcilla del pozo XIV.
Fuente: [3]



Figura 16. Muestra el patrón y su medición en el equipo de TAC.
Fuente: [3]

Tabla 2.

Muestra los valores en Hounsfield (HU) y densidad de los minerales y fluidos analizados.

Minerales y fluidos	Hounsfield (HU) promedio	Densidad (g/cm ³)
Barita	3070,93	3,44
Diabasa	2918,27	3,24
Dolomita porosa	1940,62	2,39
Serpentina	1476,21	2,15
Calcita	2392,23	2,72
Cuarzo	1628,81	2,62
Yeso	1970,96	2,57
Asfaltita	124,83	1,18
Agua de capa	56,98	1,00
Petróleo pesado	34,85	0,85

Fuente: Adaptado de [3]

Pozo XIV - Descripción de los expertos: Núcleo formado por una matriz de arcilla radiolárica con presencia aislada de calcita en forma de restos carbonatados de radiolarios y cristales de dolomita. Presenta abundante porosidad intergranular. Presencia de algunas fracturas finas de forma aislada.

La microporosidad es característica de la arcilla, fundamentalmente porosidad primaria, en este caso intergranular.

3.2. Resultados cuantitativos del trabajo realizado con las imágenes obtenidas del TAC

Para calibrar las mediciones de TAC realizadas se confeccionó un patrón compuesto por minerales y fluidos de densidades conocidas, los cuales se pueden encontrar en cualquier núcleo extraído del pozo (Fig. 16).

Los valores de cada píxel de las imágenes del patrón dados en HU se obtuvieron a partir del *ImageJ* en forma de

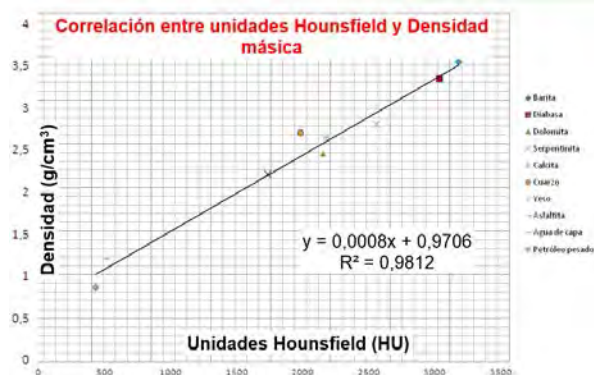


Figura 17. Muestra la relación hallada entre las Hounsfield (HU) y la densidad másica.

Fuente: [3]

histograma en cada corte de la imagen, por los pasos antes explicados, y posteriormente se halló el promedio por litología en cada corte y finalmente el promedio por litología del total de cortes, mostrándose en la Tabla 2.

La densidad de cada mineral y fluido contenido en el patrón, mostrada en la Tabla 2, fue hallada en el laboratorio de petrofísica del CEINPET por métodos convencionales.

Luego se halló la dependencia entre el valor en HU de cada mineral y fluido contenido en el patrón, obtenido por TAC, y el valor de densidad de los mismos obtenidos en el laboratorio del CEINPET. La correlación obtenida se muestra en la Fig. 17 con un valor del coeficiente de correlación de 0.98, o sea con una certeza del 98%.

La ecuación que responde a esta relación se muestra a continuación:

$$\rho = 0.00079HU + 0.97062 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \quad (2)$$

Luego, partiendo de la ecuación (1) y tomando como ρ_b la densidad calculada por la ecuación (2) se puede calcular la porosidad.

También se puede calcular la porosidad directamente a partir de los valores HU obtenidos por TAC, como se muestra en la ecuación (3).

$$\phi_i = \frac{CT_{mx} - CT_i}{CT_{mx} - CT_{aire}} \quad (3)$$

Donde:

CT_{mx} es el valor de TAC para la matriz.

CT_i es el valor obtenido por TAC para el píxel i .

CT_{aire} es el valor de TAC para el aire.

El valor de densidad de matriz que se introduce en la ecuación (1) debe variar en dependencia de la litología presente. En una roca estándar que se puede encontrar en los pozos petroleros van a coexistir varias litologías en un mayor o menor por ciento en dependencia de las condiciones de sedimentación de la roca. Luego al tomar como valor de densidad de matriz el valor de densidad del mineral o el valor de densidad de matriz de una roca con 100% de una litología determinada, se puede incurrir en un error. Lo que se evidencia con la obtención de valores

Tabla 3.

Muestra los valores promedios de densidad y porosidad hallados.

Pozo	Densidad volumétrica por TAC	Densidad de matriz (patrones)	Porosidad calculada	Densidad de matriz corregida	Porosidad rectificada
	g/cm ³	g/cm ³	V/V	g/cm ³	V/V
VI	2,53	2,71	0,10	2,71	0,10
VII	2,85	2,88	0,02	2,88	0,02
VIII	1,74	2,71	0,57	2,65	0,55
IX	2,58	2,71	0,07	2,71	0,07
X	2,79	2,71	-0,05	2,83	0,02
XI	2,78	2,71	-0,04	2,79	0,01
XII	2,76	2,71	-0,03	2,86	0,05
XIII	2,67	2,52	-0,1	2,67	0,00
XIV	2,49	2,52	0,02	2,53	0,03
XIV	2,13	2,52	0,26	2,52	0,26

Fuente: Adaptado de [3]

negativos de la porosidad (Tabla 3, porosidad calculada), ya que se está tomando como matriz una litología que en realidad no corresponde a la matriz en esa roca o sección.

Luego el procedimiento seguido fue tomar como densidad de matriz el valor de densidad que correspondiente con el mayor número de conteos en cada corte o sección del corte.

También se halló la porosidad utilizando la ecuación (3), donde igualmente se tomó, para el valor HU de matriz, el valor HU correspondiente con el mayor número de conteos por corte o sección; y para el aire se tomó el menor valor HU.

Se muestra en la Tabla 3 los resultados obtenidos. La data utilizada es significativa, luego el valor obtenido de densidad calculada utilizando la ecuación (2) tiene un alto grado de certeza.

Para un primer cálculo de la densidad de matriz ecuación (3,4) no se tuvieron en cuenta todas las litologías presentes, se tomó como valor de densidad de matriz el valor de densidad mineralógica calculado para el patrón, esto condujo a la obtención de valores erróneos y negativos en las porosidades. Luego, fue necesario realizar una rectificación utilizando el procedimiento explicado anteriormente.

Los valores obtenidos resultan interesantes pues, es fácil descubrir a partir de la densidad calculada, que las matrices estudiadas no son tan homogéneas como se esperaba. Esto conllevó a una revisión de las secciones delgadas y de las litologías observadas en ellas. El resultado fue que en dos de las muestras no se había detectado la presencia de barita (Pozos X, XII), la cual es fácil de reconocer en las imágenes de TAC de los núcleos, por su alta densidad. También se detectó un por ciento de arcilla representativo (31,1%) en el núcleo del pozo VIII, anteriormente descrito como caliza organógena. Lo que se evidencia en la Tabla 3 cuando el valor de densidad calculado, teniendo en cuenta una matriz de caliza (100%), resultó ser más bajo que el esperado ante esta matriz.

Se compararon los resultados de densidad y porosidad obtenidos por TAC y por registros. En la Tabla 4 se muestran los valores de densidad y porosidad hallados por registros en la zona del núcleo en el pozo IX, que corresponden con los valores obtenidos por tomografía.

Tabla 4.

Comparación de los valores de la porosidad y la densidad por registro y por TAC.

Pozo	Parámetro	Valor
Pozo IX	Densidad volumétrica por TAC (g/cm ³)	2,58
	Porosidad por TAC (V/V)	0,07
	Densidad volumétrica por registros (g/cm ³)	2,60
	Porosidad por registros (V/V)	0,06

Fuente: Adaptado de [3]

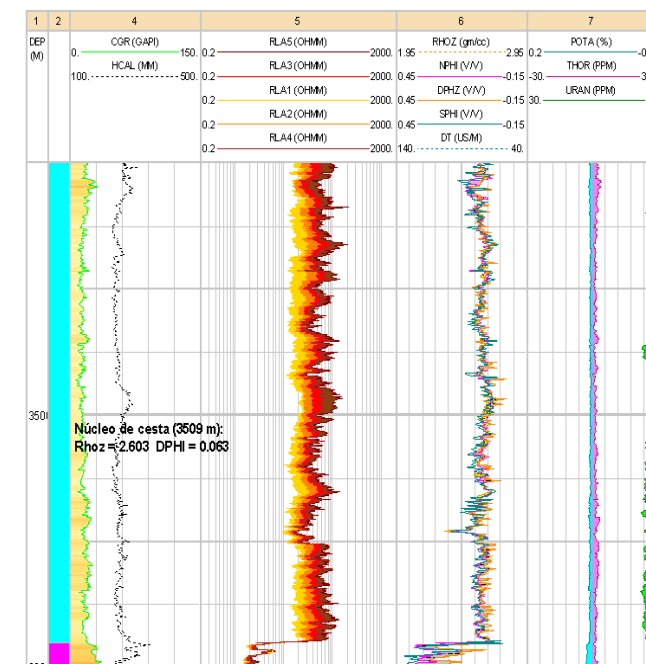


Figura 18. Muestra los valores de densidad (RhoZ) y porosidad (DPHI) por registros del núcleo en el Pozo IX.

Fuente: [3]

En la Fig. 18 aparecen los valores insertados en la profundidad correspondiente del registro.

4. Conclusiones

Se obtuvieron imágenes de tomografía axial computarizada, de varios núcleos extraídos de diferentes pozos con litologías representativas. Dichas imágenes muestran la composición interna de los núcleos sin daño alguno a los mismos y corresponden con las descripciones de los expertos.

La aplicación de este método demostró sus potencialidades para ser utilizado en la evaluación cuantitativa de las propiedades de las rocas (porosidad y densidad volumétrica), para lo cual se estableció una metodología que permite hallar la densidad y porosidad media y en cada punto de los núcleos estudiados con la ayuda del software *ImageJ* y del patrón confeccionado. La validación de dicha metodología se encuentra en un nivel primario, para lo cual se compararon sus resultados con los

obtenidos mediante métodos convencionales, tanto de laboratorio (directos) como de registros (indirectos).

abril del 2012]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/101735260/Writing-ImageJ-Plugins-A-Tutorial>

Agradecimientos

El presente trabajo no hubiera sido posible sin la indispensable ayuda de muchos profesionales que inmediatamente nos abrieron las puertas a su valioso conocimiento y a tecnologías de avanzada en Cuba. Sin querer omitir ningún colaborador, la presente investigación agradece a: la Dra. Norma Rodríguez, a la Dra. Olga Castro Castiñeira, al Dr. Osvaldo Rodríguez Morán y todos los profesionales de la unidad de exploración del CEINPET, a los especialistas y técnicos de Medicina Nuclear del Hospital Hermanos Ameijeiras fundamentalmente al Dr. Caballero, a los trabajadores del CEAC, al Dr. Díaz Rizo, y a los graduados del InSTEC que trabajan en el CEAC, a la Dra. Alina Gelen y a los especialistas del departamento de Protección Radiológica del InSTEC, a los especialistas del Instituto Nacional de Oncología y Radiobiología (INOR) fundamentalmente al compañero Joaquín González.

Bibliografía

- [1] Descripción realizada por expertos del Centro de Investigaciones del Petróleo, en informes de pozo, Archivo Técnico (CEINPET).
- [2] Díaz-Viera, M.A. y Cazar, G.R., Modelado y simulación de un medio poroso vulgar, Instituto Mexicano del Petróleo. [en línea], 2004. [Fecha de consulta abril de 2012]. Disponible en: <http://mmc.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/Presentaciones/Ejemplo%20Simulacion.pdf>
- [3] Miquel-Lisset y Ortiz-Gilbert, Empleo de técnicas nucleares analíticas en el estudio de las características litológicas y de las propiedades de las rocas sello y reservorio de los yacimientos petroleros cubanos. Tesis de grado (Ingeniería), Instituto Superior de Tecnologías Nucleares y Energéticas, Cuba, Habana, 2012, 73 P.
- [4] Kayser, A., Knackstedt, M. y Murtaza, Z. Una observación más detallada de la geometría de los poros, Oilfield Review, [en línea] verano de 2006. [Fecha de consulta abril 2012] Disponible en: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish06/sum06/p4_15.pdf
- [5] Kunik, D., Introducción al Programa ImageJ, Contacto <dkunik@df.uba.ar>, [en línea] 2006. [Fecha de consulta mayo del 2012]. Disponible en: <http://difusion.df.uba.ar/ConectarIgualdad/ImageJ.pdf>
- [6] Rodríguez-Loeches, J., Estudio de las propiedades de reservorio en el yacimiento Santa Cruz a través del estudio de núcleos y su interrelación con los resultados de los registros geofísicos, Informes de pozo. Archivo Técnico (CEINPET). México, 2006.
- [7] San Antonio, T., Muller-Karger, C. y Casanova, E., Influencia del modelado de las condiciones de borde en la simulación de ensayos mecánicos de huesos bovinos-b, Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 23(2), [en línea] Caracas feb. 2008. [Fecha de consulta abril 2012] Disponible en: http://www.scielo.org/ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000200001
- [8] Schlumberger, Principios y aplicaciones de la interpretación de registros, [en línea]. 1987. [Fecha de consulta abril de 2012] Disponible en: <https://es.scribd.com/document/95473890/principios-y-aplicaciones-de-la-interpretacion-de-registros>
- [9] Writing ImageJ Plugins-A Tutorial Version 1.71. Based on ImageJ Release 1.36. Upper Austria University of Applied Sciences. Werner Bailer. Dept. of Media Technology and Design. Hagenberg, Austria. In July2, 2006. <ijtutorial@fh-hagenberg.at>. [Fecha de consulta

L. Miquel-González, recibió el título de Ing. en Ingeniería en Técnicas Nucleares y Energéticas en 2012, en el Instituto Superior de Tecnologías Nucleares y Energéticas, Cuba, Ciudad Habana. Ha cursado posgrados en la rama del petróleo y gas en la universidad AGH de Cracovia, Polonia; y la Universidad KFU de Kazán, Rusia. Desde 2012 hasta la fecha, ha estado trabajando como especialista 3 en análisis de registros geofísicos, en el Centro de Investigaciones del Petróleo, en el sector energético, perteneciente a la compañía Cuba-Petróleo (Cupet). Sus intereses investigativos incluyen: análisis de registros geofísicos de pozos petroleros, mediciones petrofísicas de laboratorio, utilización de métodos de resonancia magnética nuclear en la caracterización de carbonatos, negocios de petróleo y gas, aplicación de técnicas nucleares en la petrofísica. ORCID:

G. Ortiz-Rabell, recibió el título de Ing. en Ingeniería en Técnicas Nucleares y Energéticas en 2012, en el Instituto Superior de Tecnologías Nucleares y Energéticas, Cuba, Ciudad Habana. Ha cursado posgrados en la rama del petróleo y gas en la universidad AGH de Cracovia, Polonia; y la universidad KFU de Kazán, Rusia. Desde 2012 hasta la fecha, ha estado trabajando como especialista 3 en análisis de registros geofísicos, en el Centro de Investigaciones del Petróleo, en el sector energético, perteneciente a la compañía Cuba-Petróleo (Cupet). Sus intereses investigativos incluyen: análisis de registros geofísicos de pozos petroleros, estudio de las propiedades mecánicas y elásticas de las rocas en los yacimientos petroleros, negocios de petróleo y gas, aplicación de técnicas nucleares en la petrofísica. ORCID:

O. Castro-Castiñeira, se graduó como Ingeniera Geofísica en 1974 y obtuvo el grado de Dra. en Ciencias de la Tierra en 1992, todo en la Ciudad Universitaria José Antonio Echeverría de la Habana, Cuba. Ha trabajado en el Centro de Investigaciones del Petróleo a través de los años como especialista en petrofísica, labor que sigue realizando paralelamente a la de profesora en la Universidad. Tiene artículos con resultados de sus investigaciones en publicaciones nacionales y extranjeras, un grupo de los cuales aparecen recogidos en el libro Evaluación Petrofísica de las Formaciones Gasopetrolíferas Cubanas (2017). ORCID:

NPV analysis as a function of the discount rate and cost of re-handling implementing SIMSCHED DBS to open pit mining

Carolina Navia-Vásquez, María Camila Monsalve-Hinestroza & Giovanni Franco-Sepúlveda

Grupo de Planeamiento Minero, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. cnaviav@unal.edu.co, mcmonsalveh@unal.edu.co, gfranco@unal.edu.co

Received: August 24th, 2016. Received in revised form: December 20th, 2016. Accepted: January 12th, 2017.

Abstract

The function of all software is to model situations that look like reality, in order to find the most viable conditions for developing a mining project, since in these what is sought is to increase revenue and reduce costs by making better decisions. In this industry investors seek to obtain the highest income in exploiting underground resources, with the aim of achieving return on investment. In this article the discount rate and the cost of rehandling of a mineral deposit hypothetical gold and copper is evaluated using the SIMSCHED DBS software. In turn a search for information, which can give clarity to the concepts with which you are working, is done. Based on the simulations performed with the two economic variables you can select the optimal net present value (NPV) for future flows.

Keywords: Rehandling cost; discount rate; NPV; Simsched DBS.

Análisis del VPN en función de la tasa de descuento y el costo de remanejo implementando SIMSCHED DBS para una explotación minera a cielo abierto

Resumen

La función de todo software es modelar situaciones que se asemejan a la realidad, con el fin de encontrar las condiciones más viables para desarrollar un proyecto minero, lo cual implica incrementar ingresos y reducir costos mediante la toma de decisiones. En esta industria los inversionistas buscan obtener los ingresos más altos a la hora de explotar los recursos del subsuelo, con el objetivo de lograr el retorno a la inversión. En el presente artículo se evalúa la tasa de descuento y el costo de remanejo de un depósito mineral hipotético de oro y cobre, utilizando el software SIMSCHED DBS. A su vez se hace una revisión bibliográfica la cual permite dar claridad a los conceptos utilizados. Con base a las simulaciones realizadas con las dos variables económicas se pretende seleccionar el valor presente neto (VPN) más óptimo para los flujos futuros.

Palabras clave: Costo de remanejo; tasa de descuento; VPN; Simsched DBS.

1. Introducción

Uno de los grandes problemas en la industria minera se encuentra en los costos de operación. En minería y en la mayoría de las industrias, los procesos de innovación están enfocados a la cadena de valor, es decir, a disminuir costos y afectaciones ambientales desde los procesos de perforación, operación y posteriormente en el cierre.

Si el consumo en estos costos de operación minera disminuye, los ingresos serían mayores y el VPN incrementaría. Los proyectos y los inversionistas mineros buscan rentabilidad y viabilidad económica obteniendo una ganancia por encima de la necesaria para mantener su actividad [1].

En el momento de elegir el valor de la tasa de descuento y el costo de remanejo en un proyecto, se debe realizar un análisis económico cuidadosamente ya que el principal

How to cite: Navia-Vásquez, C., Monsalve-Hinestroza, M.C. & Franco-Sepúlveda, F., Análisis del VPN en función de la tasa de descuento y el costo de remanejo implementando SIMSCHED DBS para una explotación minera a cielo abierto. Boletín de Ciencias de la Tierra, (41), 81-86, 2017.

objetivo es maximizar el VPN del proyecto y su rentabilidad económica.

Los programas computacionales en minería han sido ficha clave cuando se pretende optimizar procesos y maximizar el VPN en un proyecto minero, estos programas de innovación tecnológica buscan disminuir riesgos e incertidumbres al tomar una decisión para el desarrollo de un proyecto.

Simsched DBS es un software minero creado en Brasil por un grupo de profesionales expertos en el área computacional y en el área de minería. Este programa cuenta con alta tecnología innovadora para determinar la programación directa de bloques, decidiendo cuáles bloques serán explotados, cuándo y cuál será el destino de cada uno de ellos, a partir de un modelo de bloques importado, donde el resultado final será una simulación en 3D [2].

Las variables que se importan a este programa son la densidad del mineral, las leyes de corte respectivas de cada mineral, ángulos de talud, recuperación del mineral y valores económicos tales como tasa de descuento y costo de remanero que influyen significativamente dentro de un proyecto minero. Simsched DBS es un software que brinda numerosas facilidades al usuario, ya que, este es el que determina las restricciones del depósito y los valores que se pretenden simular.

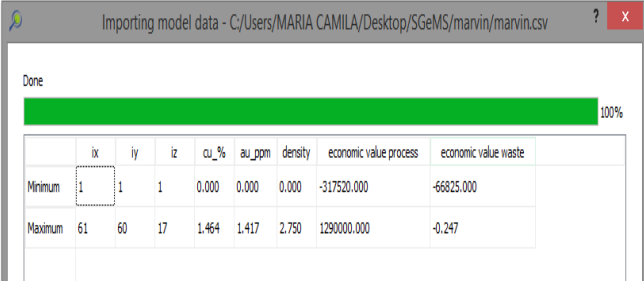
Este artículo desarrolla un análisis sobre un depósito mineral hipotético de oro y cobre, identificando los cambios en el VPN de acuerdo con la variación de la tasa de descuento y el costo de remanero, haciendo uso del programa Simsched. Por medio de las simulaciones se busca encontrar un valor para el VPN que sea viable y maximice la rentabilidad económica, a su vez indique que las decisiones tomadas sean acertadas y se acerquen a la realidad.

2. Metodología

En la elaboración del presente artículo se llevó a cabo un proceso lo cual tiene como primer paso la instalación de las licencias del software, seguido se ingresa la base de datos suministrada por la misma empresa encargada del programa, dicha base de datos llamada MARVIN, la cual contiene información de un depósito hipotético cobre – oro.

Al ingresar dicha base de datos el programa arroja valores mínimos y máximos de diferentes variables que se deben tener en cuenta para la simulación, como lo son las dimensiones del bloque (Ix, Iy, Iz), porcentaje de cobre, partes por millón de oro, densidad, valor económico del proceso y del botadero. En la Fig. 1 se muestra la información arrojada por el software después de hacer lectura de la base de datos.

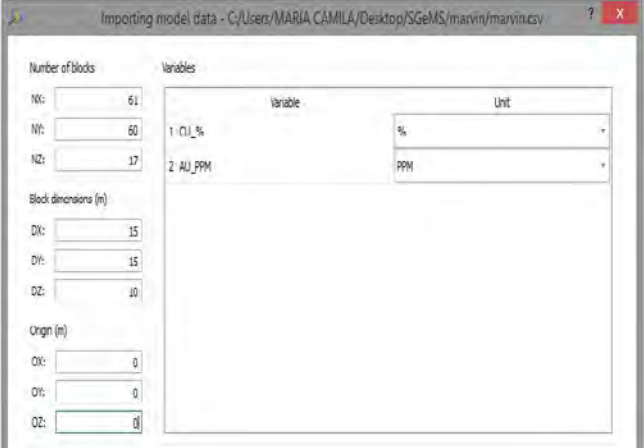
Posterior al análisis de la información suministrada, se procede con el ingreso de los datos numéricos para el modelamiento del bloque, esta información en función al tamaño del depósito que se desea simular, en este caso se toman dimensiones de 15 m x 15 m x 10 m y se parte del origen, como se muestra en la Fig. 2.



	ix	iy	iz	cu_%	au_ppm	density	economic value process	economic value waste
Minimum	1	1	1	0.000	0.000	0.000	-317520.000	-66825.000
Maximum	61	60	17	1.464	1.417	2.750	1290000.000	-0.247

Figura 1. Información arrojada por el software después de hacer lectura de la base de datos.

Fuente: Elaboración propia en software Simsched DBS.



Number of blocks: 61

Block dimensions (m): DX: 15, DY: 15, DZ: 10

Origin (m): OX: 0, OY: 0, OZ: 0

Variable	Unit
1 Cu_%	%
2 Au_PPM	PPM

Figura 2. Consideraciones para el modelamiento del bloque.

Fuente: Elaboración propia en software Simsched DBS.

Al ingresar estos valores se puede tomar la decisión de ver el modelo o de continuar con la programación directa de bloques, eligiendo las diferentes vistas del modelo simulado en 3D, resultado que se observa en las Figs. 3, 4, 5 y 6.

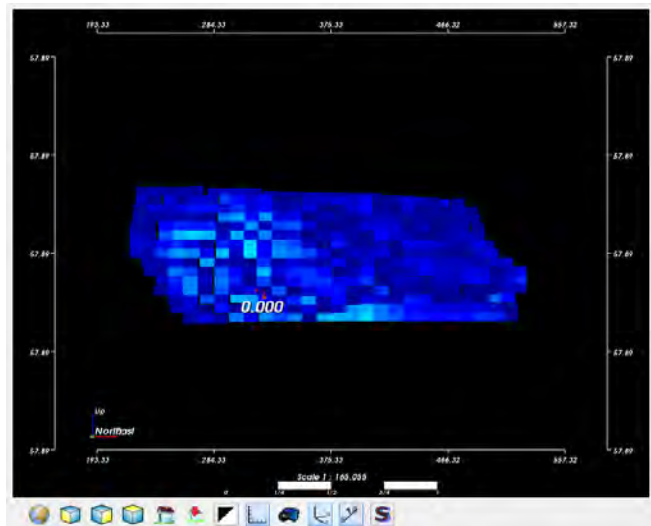


Figura 3. Vista lateral izquierda del modelo de bloques.

Fuente: Elaboración propia en software Simsched DBS.

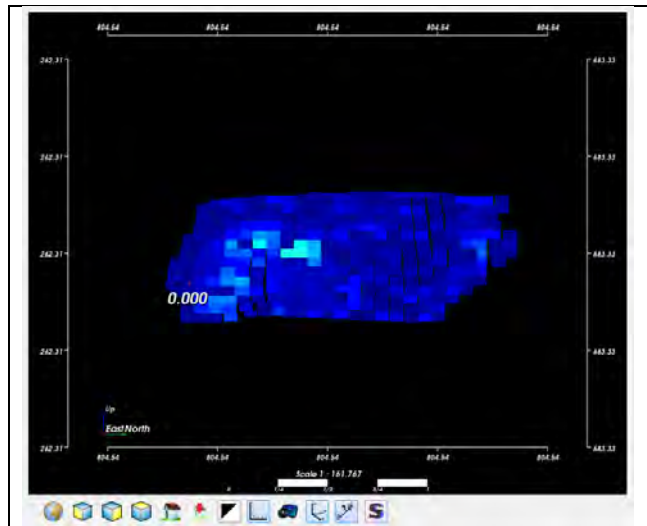


Figura 4. Vista lateral derecha del modelo de bloques.
Fuente: Elaboración propia en software Simsched DBS.

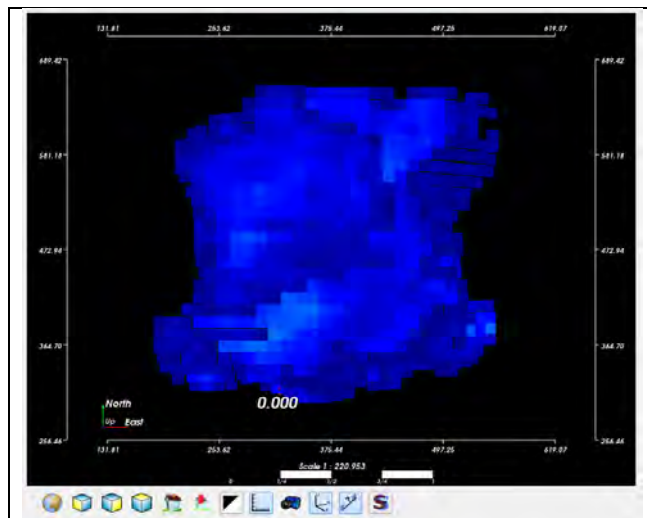


Figura 5. Vista superior del modelo de bloques.
Fuente: Elaboración propia en software Simsched DBS.

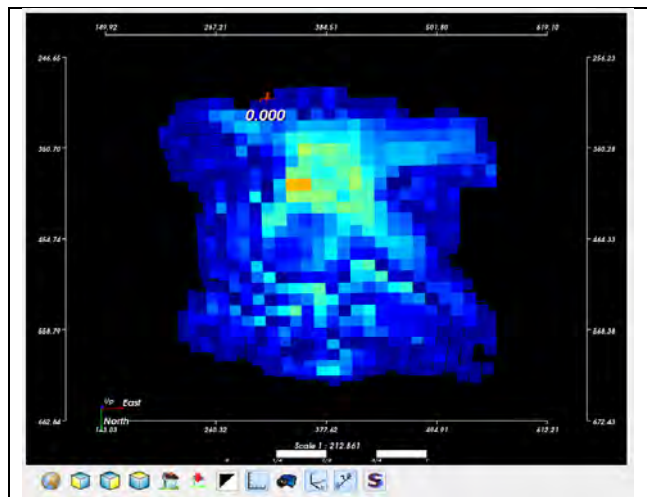


Figura 6. Vista lateral izquierda del modelo de bloques.
Fuente: Elaboración propia en software Simsched DBS.

Tabla 1.
Variables económicas y físicas de la mina.

Descripción	Valor	Unidad
Recuperación del Cu	70	%
Recuperación del Au	60	%
Densidad	2.7	t/ m ³
Ángulo de talud	40	° Grados
Avance vertical	10	m
Fondo mínimo	50	m
Costos fijos	2.4	US\$/t
Tasa de descuento	10	%
Costo de remanejo	0.2	US\$/t

Fuente: Elaboración propia.

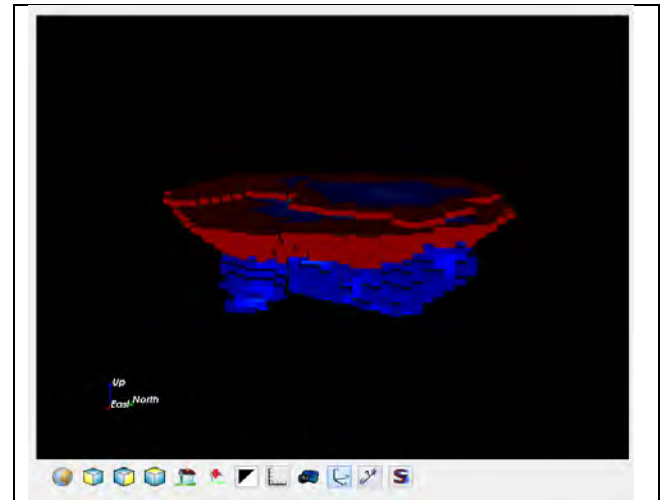


Figura 7. Simulación en 3D del depósito.
Fuente: Elaboración propia en software Simsched DBS.

Continuando con la simulación se habilita la opción de habilitar valores a las variables económicas y físicas de la mina, para nuestro caso de estudio se asignan valores tal como se muestra en la Tabla 1.

Estos valores son editados por el usuario con el objetivo de obtener los periodos, vistas en 3D de los bloques programados y superficies. En la Fig. 7 se puede observar la simulación en 3D en el software Simsched del depósito en estudio.

Al obtener los resultados y gráficos de acuerdo a la información editada, se procede a un análisis conceptual de las dos variables económicas que se trabajan con el fin de analizar cómo afecta el VPN del proyecto y cuáles serían los valores más óptimos.

2.1. Tasa de descuento

Todo proyecto minero se evalúa utilizando la tasa de descuento, con el fin de actualizar flujos futuros para traerlos al presente [3].

La tasa de descuento desempeña una labor de suma importancia sobre la evaluación económica de un proyecto, esta permite determinar la viabilidad y rentabilidad de un proyecto minero, este es el aspecto más importante y difícil

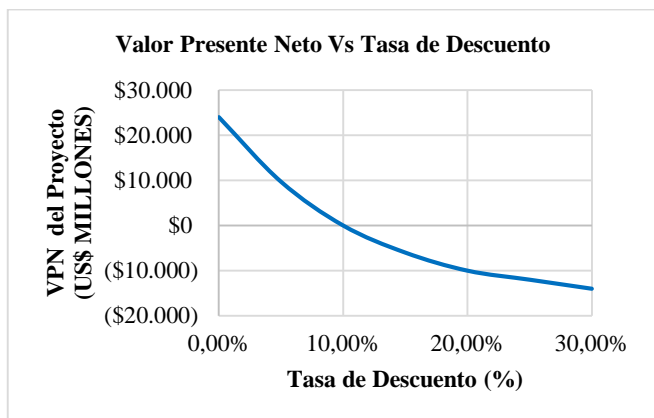


Figura 8. Valor presente neto Vs tasa de descuento.
Fuente: Elaboración propia a partir de [5].

del análisis del flujo de caja. El proyecto en estudio puede ser aceptado o rechazado en función de la tasa de descuento e incluso cuando otros factores como la tasa de interés, vida de la mina y las leyes de corte del mineral se utilizan como entradas para el cálculo del VPN, [4].

Desafortunadamente, es difícil seleccionar la mejor tasa de descuento en un proyecto minero. Sin embargo, es posible determinar una tasa de descuento apropiada para un proyecto identificando los factores de riesgos en proyectos mineros en general y los riesgos relacionados en nuestro caso de estudio.

El porcentaje de la tasa de descuento más rentable en un proyecto minero de gran magnitud varía entre el 0% y 30%, donde los proyectos más exitosos cuentan con una tasa entre el 10% al 15% [5]. Esto es ilustrado en la Fig. 8.

La tasa de descuento y el cambio en el flujo de caja, cambia significativamente los ingresos y los costos de un proyecto.

Dentro de los factores que influyen para determinar la tasa de descuento se encuentran los siguientes:

- Riesgos económicos
- Riesgos técnicos
- Riesgos políticos

Las incertidumbres o los riesgos en los proyectos mineros son generalmente más grandes en comparación con las otras industrias. Estos riesgos pueden surgir de las estimaciones de las reservas, demanda del mineral en el mercado, precios de mineral, extracción, riesgo del país, etc.

2.2. Costo de Remanejo

Un proyecto minero consta de diferentes etapas en las que se debe hacer una adecuada planificación y/o modelación, en estas se involucran costos de operación, errores asociados a mediciones y estimaciones [6].

El término “Costo de remanejo” se define como el valor económico que se debe asumir cuando el material que ya ha transitado por el proceso de beneficio, aún presenta concentraciones significativas de mineral de interés, este costo está en función de la cantidad de material que se beneficia, el tipo de transporte, y el método de beneficio. Otra

forma de maximizar el VPN es calculando la ley de corte crítica que se torne beneficiosa para los botaderos, con el fin de procesar de nuevo el mineral para reducir costos de operación y así incrementar flujos de cajas. La incertidumbre de la ley del mineral puede provocar discrepancias entre las expectativas de planificación y producción real, controlar dicha incertidumbre puede ser una forma óptima de incrementar el VPN al valor deseado o planificado [7].

El costo de remanejo es un variable importante que influye significativamente en el cálculo del costo sobre producción.

El costo de descuento sobre la producción es determinado por la ecuación (1):

$$C_{op}(t) = T_{OP}(t) \times C_{op,RH}(t) \quad (1)$$

Donde $C_{op}(t)$ es el tonelaje costo de descuento de la sobre producción del mineral; $T_{OP}(t)$ es llamado el tonelaje de la sobre producción del mineral y $C_{op,RH}(t)$ son los costos de las reservas y el remanejo sumado a la pérdida del valor del mineral para el procesamiento del próximo periodo [7].

En el diseño de botaderos, una consideración particular tiene que ser dada a las necesidades de recuperación si el costo es para ser minimizado, la pendiente general del rostro volcado tiene que reducirse para evitar la erosión y así permitir la implementación de mejores suelos y vegetación. El diseño debe considerarse volcado de terrazas para reducir al mínimo la cantidad de material remanejado ya que el costo de remanejo disminuye en proporción al cuadrado de la inversa de la cantidad de terrazas en el que un botadero puede derrumbarse. Por lo tanto, un botadero construido usando tres terrazas tendrá solamente una novena parte de los costos de explanación de un botadero de altura similar sin terrazas [8].

De la misma manera es posible maximizar el VPN como función de la variación de la ley de corte sino también en los planes a corto y largo plazo de los camiones y las palas disponibles en las minas, que se generan en la operación minera con el fin de disminuir costos operativos para así aumentar la producción, teniendo en cuenta los parámetros económicos, periodos de tiempo, incertidumbre en los tiempos de carga y viaje, y las leyes del mineral [9].

3. Resultados

Se varió la tasa de descuento en incrementos de 0.5 en un rango de 5% hasta 15%. Ya que estos valores son los más competitivos en la industria minera. Se encontró que al disminuir la tasa de descuento el VPN se incrementaba mientras que si la tasa de descuento aumentaba el valor del VPN del proyecto disminuía.

En este caso de estudio también se realizó un análisis detallado en el valor igual a cero de la tasa de descuento, donde el programa simuló el VPN más alto en este punto. Se concluyó que la tasa de descuento de este depósito no puede ser igual a cero, así se obtenga el VPN mayor, ya que el objetivo es formar un equilibrio con las variables físicas y económicas de la mina para su buen funcionamiento en el futuro.

Tabla2.

Variaciones económicas de la tasa de descuento para el cálculo del VPN.

Tasa de Descuento (%)	VPN acumulado (M\$)
15	1136.68
14.5	1145.42
14	1154.29
13.5	1163.29
13	1172.41
12.5	1181.67
12	1191.06
11.5	1200.59
11	1210.25
10.5	1220.70
10	1230.02
9.5	1240.13
9	1250.38
8.5	1260.80
8	1271.37
7.5	1282.10
7	1293.00
6.5	1304.06
6	1315.30
5.5	1326.72
5	1338.31

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran en las Tablas 2 y 3 los resultados que se obtuvieron de las simulaciones en el programa Simsched para determinar los valores óptimos en este depósito hipotético.

Durante el análisis de la variable costo de remanaje se realizan 20 simulaciones teniendo como valor mínimo 0.025 y como valor máximo 0.5 \$/t, claramente se percibe que la variable no afecta en ningún intervalo el valor del VPN acumulado, resultado que se obtiene al momento de añadir los procesos al programa, condicionalmente no se habilita la opción de agregar algún porcentaje de mineral a los botaderos. El principal objetivo en los procesos de beneficio es una recuperación del 100%, que en la práctica no se alcanza, por ende en los botaderos siempre se cuenta con un porcentaje considerable (mínimo) de mineral de interés.

Tabla3.

Variaciones en el costo de remanaje utilizados para el cálculo del VPN.

Variación del Costo de Remanaje (\$/t)	VPN Acumulado (M\$)
0.5	1230.02
0.475	1230.02
0.45	1230.02
0.425	1230.02
0.4	1230.02
0.375	1230.02
0.35	1230.02
0.325	1230.02
0.3	1230.02
0.275	1230.02
0.25	1230.02
0.225	1230.02
0.2	1230.02
0.175	1230.02
0.15	1230.02
0.125	1230.02
0.1	1230.02
0.075	1230.02
0.05	1230.02
0.025	1230.02

Fuente: Elaboración propia.

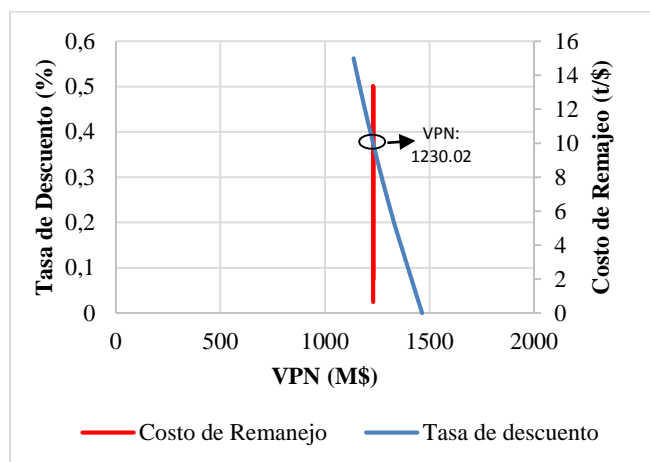


Figura 9. Intersección del VPN de la tasa de descuento y el costo de remanaje.

Fuente: Elaboración propia.

Con lo anterior se argumenta el resultado obtenido en la simulación, y se evidencia la incertidumbre entre una condición hipotética y las condiciones reales dentro de un proyecto minero, condiciones que deben adecuarse.

El valor más óptimo de la tasa de descuento para un inversionista y la rentabilidad de este proyecto teniendo en cuenta el costo de remanaje y las variables físicas del depósito fue del 10%.

En los resultados de las Tablas 2 y 3 se logró observar que en el valor 10 % de la tasa de descuento y cualquier valor del costo de remanaje, el VPN será de \$ 1230.02 \wedge 6. En la Fig.9 se puede observar el punto de equilibrio entre la tasa de descuento y el costo de remanaje.

4. Conclusiones

Se enumeran a continuación algunas conclusiones:

- El valor de la tasa de descuento cambia notablemente los flujos futuros de este depósito. Esto se ve reflejado en grandes cantidades de dinero que se analizaron solo variando la tasa de descuento en el programa, por esta razón si la tasa es baja los flujos futuros suben y aumentan el valor del proyecto, y así no se presentarán afectaciones económicas para los inversionistas y el proyecto en cuestión.
- La tasa de descuento más rentable para este depósito hipotético fue del 10%, ya que el VPN acumulado en este valor muestra un equilibrio tanto en las variables económicas y físicas de la mina.
- La tasa de descuento determina la viabilidad de un proyecto y esta nunca puede tomar un valor igual a cero, ya que los flujos futuros serían iguales a los del presente y el dinero no cambia en el tiempo.
- Al variar el costo de remanaje este no afecta el flujo de caja, resultado derivado de no ingresar al programa el porcentaje de recuperación en los botaderos, por lo que se infiere que los botaderos solo contienen estéril.

- E. El programa Simsched es un programa de programación eficiente, con la que se busca maximizar el VPN de todo proyecto minero, optimizando todos los periodos simultáneamente.

Agradecimientos

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

Referencias

- [1] Cadernatori, J., Paéz, S.C. y Soto, D.J.D., Tasas óptimas para el impuesto a la minería del cobre en Chile, Polis, 2014, [en línea]. [Consultado 21 de julio de 2016]. Disponible en: <http://polis.revues.org/9862>.
- [2] Mining Math, Software – SimSched Direct Block Scheduler [on line] 2016. Disponible en: <http://www.simsched.com>.
- [3] Epstein, R., Tasa de descuento en proyectos mineros. Revista Gestión Minera, Universidad de Chile, abril, 2012. [en línea]. Disponible en: <http://www.dii.uchile.cl/wpcontent/uploads/2012/04/REVISTA-GESTION-MINERA-Tasa-de-Descuento-en-Proyectos-Mineros-columna-Rafael-Epstein-abril-2012.pdf>.
- [4] Park, S.-J. and Matunhire, I.I., Investigation of factors influencing the determination of discount rate in the economic evaluation of mineral development projects. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 11, pp. 773-779, 2011.
- [5] Smith, L.D., Discount rates and risk assessment in mineral project evaluations. Canadian Institute of Mining and Metallurgical Bulletin, 88(989), pp. 34-43, 1995.
- [6] Barrios, L. y Renato, G., Estudio de métodos de optimización robusta para el problema de planificación de producción en minería a cielo abierto. Tesis Magíster en gestión de operaciones, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2011, 105 P.
- [7] Behrang, K., Hooman, A. and Clayton, D., A linear programming model for long-term mine planning in the presence of grade uncertainty and a stockpile, International Journal of Mining Science and Technology, [on line], 24(4), pp. 451-459, 2014, [Fecha de consulta 21 de Julio de 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S2095268614000792>. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.05.006.
- [8] Kennedy, B.A. Surface mining, 2 da Ed, Colorado, Society for mining, metallurgy, and exploration, 1990, pp. 480-490.
- [9] Gurgur, C.Z., Dagdelen, K. and Artittong, S., Optimisation of a real-time multi-period truck dispatching system in mining operations. International Journal of Applied Decision Sciences, (4), pp. 57-79, 2011. DOI:10.1504/IJADS.2011.03809.

M.C. Monsalve-Hinestroza, Estudiante de Ingeniería de Minas y Metalurgia, decimo semestre, joven investigador en Colciencias, estudiante auxiliar en Grupo de Planeamiento Minero (GIPLAMIN). Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, Facultad de minas. ORCID: 0000-0001-7090-8100.

G Franco-Sepúlveda, Graduado como Ing. de Minas y Metalurgia en 1998, MSc. en Ciencias Económicas en 2006 y candidato a Dr. en Ingeniería, todos de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Colombia. Actualmente profesor auxiliar en dedicación exclusiva adscrito al Departamento de Materiales y Minerales de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Colombia y director del Grupo de Planeamiento Minero-GIPLAMIN, grupo C - Colciencias. ORCID: 0000-0003-4579-8389.

C Navia-Vásquez, Estudiante de Ingeniería de Minas y Metalurgia, octavo semestre, joven investigador en Colciencias, estudiante auxiliar en Grupo de Planeamiento Minero (GIPLAMIN). Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, Facultad de Minas. ORCID: 0000-0002-3968-7175.

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. 41

Es una edición de 150 ejemplares en papel
y se terminó de imprimir en el mes de Enero de 2017

En Todográficas Ltda.

Medellín - Colombia

Geomorphological characterization and mapping of Cartagena de Indias and adjacencies
Max Furrier; Germán Vargas-Cuervo & Cristian Camilo Moncada

Characterization of weathering profiles of the crystal rocks of eastern Bucaramanga and definition of hydrogeological properties
Juan Diego Colegial Gutierrez, María Camila Forero Quintero, María Alejandra Fuentes Rueda & Sully Gómez Isidro

Mathematization of geology
Ludger O. Suarez-Burgoa

Geotechnical variations on a tropical soil produced by municipal solid waste leachate
Alejandro Quintero Ramírez, Yamile Valencia González & Luis Augusto Lara Valencia

Petrography, geochemistry and geochronology of metamorphic rocks outcropping in San Francisco Putumayo and the Palermo-San Luis road associated with the La Cocha - River Tellez and Aleluya complexes
Gilberto Zapata García, Gabriel Rodríguez García & María Isabel Arango Mejía

Inventory of the sites of geological interest, in the southwestern of Antioquia Colombia
Albeiro Rendón Rivera, Ángela María Henao Arroyave & Juan Guillermo Osorio Cachaya

Tomography axial computerized technique application to improve Cuban oil fields seal and reservoir rocks characterization
Lisset Miquel González Gilbert Ortiz Rabell & Olga Castro Castiñeira

NPV analysis as a function of the discount rate and cost of re-handling implementing SIMSCHED DBS to open pit mining
Carolina Navia-Vásquez, María Camila Monsalve-Hinestroza & Giovanni Franco-Sepúlveda

Caracterización y mapeo geomorfológico de Cartagena de Indias y adyacencias
Max Furrier; Germán Vargas-Cuervo & Cristian Camilo Moncada

Tipificación de perfiles de meteorización de rocas cristalinas al oriente de Bucaramanga y definición de propiedades hidrogeológicas
Juan Diego Colegial Gutierrez, María Camila Forero Quintero, María Alejandra Fuentes Rueda & Sully Gómez Isidro

Matematización de la geología
Ludger O. Suarez-Burgoa

Variaciones geotécnicas en un suelo tropical causadas por los lixiviados de residuos sólidos urbanos: Escala laboratorial
Alejandro Quintero Ramírez, Yamile Valencia González & Luis Augusto Lara Valencia

Petrografía, geoquímica y geocronología de rocas metamórficas aflorantes en San Francisco Putumayo y la vía Palermo-San Luis asociadas a los complejos La Cocha – Río Tellez y Aleluya
Gilberto Zapata García, Gabriel Rodríguez García & María Isabel Arango Mejía

Inventario de sitios de interés geológico en el suroeste Antioqueño Colombia
Albeiro Rendón Rivera, Ángela María Henao Arroyave & Juan Guillermo Osorio Cachaya

Aplicación de la técnica de tomografía axial computarizada para mejorar la caracterización de las rocas sello y reservorio de los yacimientos petroleros cubanos
Lisset Miquel González, Gilbert Ortiz Rabell & Olga Castro Castiñeira

Análisis del VPN en función de la tasa de descuento y el costo de remanejo implementando SIMSCHED DBS para una explotación minera a cielo abierto
Carolina Navia-Vásquez, María Camila Monsalve-Hinestroza & Giovanni Franco-Sepúlveda