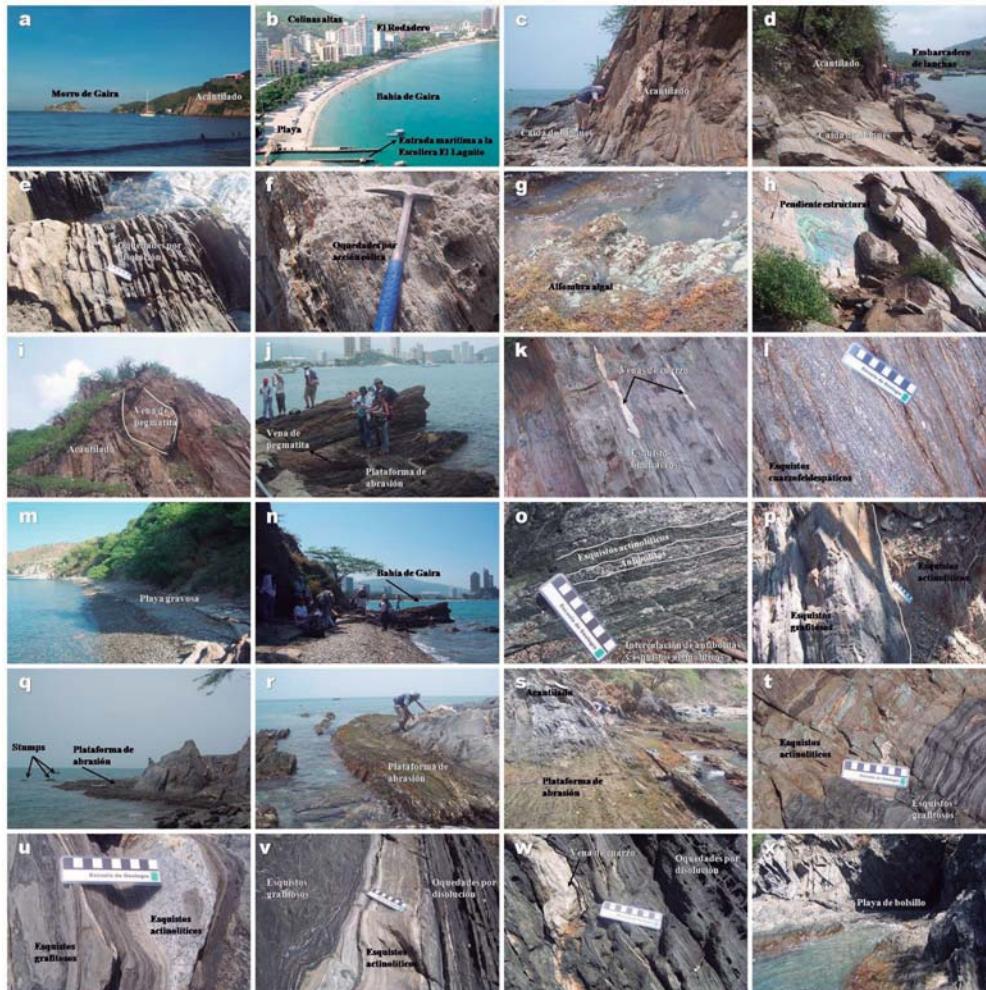


BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

No. 42, Julio de 2017

ISSN 0120 - 3630



Itinerario geológico de la franja costera entre el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta
Julie Andrea Sáenz-Reyes, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón

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



BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Número 42, Julio 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
- Geofísica
- Georesursos
- Geografía
- Mineralogía
- Geomecánica
- Geología regional
- Geomorfología
- Geotecnia
- Geología ambiental
- Aprovechamiento y explotación de recursos
- Paleontología
- Vulcanología
- Estratigrafía
- Petrografía
- Petrofísica

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

La orientación general para la presentación de artículos e información interesante se puede encontrar en la dirección electrónica:
http://www.minas.medellin.unal.edu.co/index.php?option=com_content&view=article&id=96:boletin-de-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 10.

Artículo: Itinerario geológico de la franja costera entre el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta

Autores: Julie Andrea Sáenz-Reyes, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón

Revista indexada en:

Georef

SciELO - Scientific Electronic Library Online

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

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

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

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

Bryon Llano V., Asistente editorial

Amilkar David Álvarez C., Diagramación

Landssoft Ltda, Sistemas y marcas

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



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

Geological itinerary of the coastal strip between the Simon Bolivar International Airport and the Taganga Bay, Santa Marta Geotectonic Province Julie Andrea Sáenz-Reyes, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón	5
V/H spectral ratios associated with reverse faults of Quito city Roberto Aguiar-Falconí, Eduardo López-Moreno & Diego Quizanga-Martíne	25
Focal mechanism construction in the north of the colombian Central Cordillera from record the national seismological network of Colombia Gustavo Posada, Gaspar Monsalve & Ana María Abad	36
Improvement of the breakage through the drilling deviations control, case “El Roble” mine, Colombia Juan David Rincón-Durán & Jorge Martín Molina-Escobar	45
Education in Geology on the Escuela Nacional de Minas de Medellín, 1910-1937 Yohana Josefa Rodríguez-Vega & Yobenj Aucardo Chicangana-Bayona	55
Permeability and porosity changes in unconsolidated porous media due to variations of confining stress and temperature - An experimental study Guillermo Alzate-Espinosa, Juan Alejandro Arias-Buitrago, Cristhian Bernardo Morales-Monsalve, Alejandra Arbelaez-Londoño, Abel Naranjo-Agudelo, Rick Chalaturnyk & Gonzalo Zambrano	64

Our cover

Image alluding to Article:

Geological itinerary of the coastal strip between the Simon Bolivar International Airport and the Taganga Bay, Santa Marta Geotectonic Province

Authors:

Julie Andrea Sáenz-Reyes, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón



CONTENIDO

Itinerario geológico de la franja costera entre el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta Julie Andrea Sáenz-Reyes, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón	5
Relaciones V/H para espectros asociados a las fallas inversas de la ciudad de Quito Roberto Aguiar-Falconí, Eduardo López-Moreno & Diego Quizanga-Martíne	25
Construcción de mecanismos focales en el norte de la Cordillera Central colombiana a partir de registros de la red sismológica nacional de Colombia Gustavo Posada, Gaspar Monsalve & Ana María Abad	36
Mejoramiento del arranque mediante el control de las desviaciones de perforación, caso mina “El Roble”, Colombia Juan David Rincón-Durán & Jorge Martín Molina-Escobar	45
La enseñanza de la geología en la Escuela Nacional de Minas de Medellín, 1910-1937 Yohana Josefa Rodríguez-Vega & Yobenj Aucardo Chicangana-Bayona	55
Cambios en la permeabilidad y porosidad de medios porosos no consolidados debido a cambios en el esfuerzo de confinamiento y la temperatura - Un estudio experimental Guillermo Alzate-Espinosa, Juan Alejandro Arias-Buitrago, Cristhian Bernardo Morales-Monsalve, Alejandra Arbelaez-Londoño, Abel Naranjo-Agudelo, Rick Chalaturnyk & Gonzalo Zambrano	64

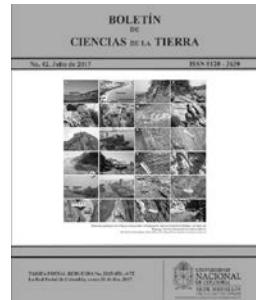
Nuestra carátula

Imagen alusiva al artículo:

Itinerario geológico de la franja costera entre el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta

Autores:

Julie Andrea Sáenz-Reyes, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón



Geological itinerary of the coastal strip between the Simon Bolivar International Airport and the Taganga Bay, Santa Marta Geotectonic Province

Julie Andrea Sáenz-Reyes ^a, Carlos Alberto Ríos-Reyes ^a & Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón ^b

^a Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, jsaenz@gmail.com, carios@uis.edu.co

^b Programa de Geología, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, oscarmca@yahoo.es

Received: August 13th, 2014. Received in revised form: December 12th 2015 Accepted: May 08th, 2017

Abstract

The Geological Itinerary of the coastal strip between the “Simón Bolívar” International Airport and the Taganga Bay, Santa Marta Geotectonic Province, represents a natural geological laboratory of great importance for the understanding of the geological evolution of the northwestern margin of South America. This work is the result of research conducted by the authors for several years and contains an updated and extensively illustrated the state of knowledge of the geological attractions of this region, with a significant contribution to the literature of regional geological. For the first time a job of this nature to the scope of the Massif Sierra Nevada de Santa Marta is presented, highlighting geological evidence of phenomena that have affected our planet. The large variety of outcrops (of stratigraphic, geomorphological, mineralogical, petrological, tectonic, etc. interest), together with the quality of exposure, makes them a great scientific and educational potential. The geological attractions included in this work in addition to their scientific and educational value, have added value thanks to its scenic appeal. Its uniqueness and beauty makes some of these places are utilized as geotourism resource.

Keywords: geological itinerary; Santa Marta; sites of geological interest; scientific; educational; landscape.

Itinerario geológico de la franja costera entre el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta

Resumen

El Itinerario Geológico de la franja costera comprendida entre el aeropuerto Internacional “Simón Bolívar” y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta, representa un laboratorio geológico natural de gran importancia para el entendimiento de la evolución geológica del margen noroccidental de Sur América. Este trabajo surge como resultado de las investigaciones realizadas por los autores durante varios años y contiene una síntesis actualizada y ampliamente ilustrada del estado de conocimiento de los lugares de interés geológico de esta región, siendo una contribución significativa para la literatura de la geología regional. Por primera vez se presenta un trabajo de tal naturaleza para el ámbito del Macizo Sierra Nevada de Santa Marta, en el que se destacan evidencias geológicas de fenómenos que han afectado nuestro planeta. La gran variedad temática de sus afloramientos (de interés estratigráfico, geomorfológico, mineralógico, petrológico, tectónico, etc.), junto a la calidad de exposición, hace que tengan un gran potencial científico y didáctico. Los lugares de interés geológico incluidos en el presente trabajo tienen, además de su valor científico y didáctico, un valor añadido gracias a su atractivo paisajístico. Su singularidad y belleza hace que algunos de estos lugares sean aprovechados como recurso geoturístico.

Palabras clave: itinerario geológico; Santa Marta; lugares de interés geológico; científico; didáctico; paisajístico.

1. Introducción

Actualmente, los términos geodiversidad, patrimonio geológico, georecurso o geoconservación, están restringidos

a un escaso grupo de geocientíficos que periódicamente alertan sobre la poca importancia que se brinda al patrimonio geológico en las políticas de conservación [1]. A nivel mundial, se pone de manifiesto que el escaso patrimonio

How to cite: Sáenz-Reyes, J.A., Ríos-Reyes, C.A. and Castellanos-Alarcón, O.M., Itinerario geológico de la franja costera entre el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta. Boletín de Ciencias de la Tierra, 42, pp. 5-24, Julio, 2017.

© The authors; licensee Universidad Nacional de Colombia. 

Revista Boletín de Ciencias de la Tierra, 42, pp. 5-24, Julio, 2017, Medellín. ISSN 0120-3630

DOI: <https://doi.org/10.15446/rbct.n42.42.44920>

geológico legalmente protegido, lo ha sido de manera casual o indirecta entre los valores "biológicos, paisajísticos, estéticos o culturales" de un determinado espacio natural, declarado protegido en razón de su valor biológico, ecológico o cultural [1]. La definición de "patrimonio geológico" es quizás la más precisa y aceptada: conjunto de elementos geológicos, cuyo valor geológico les hace destacar del entorno circundante por su interés científico, cultural y/o educativo, tales como formaciones y estructuras geológicas, paisajes geomorfológicos, yacimientos paleontológicos y mineralógicos, suelos, y otras manifestaciones geológicas de significativo valor para reconocer, estudiar e interpretar el origen y evolución de la Tierra, los procesos que la han modelado, los climas y paisajes del pasado y presente, y el origen y evolución de la vida [2]. Como se deduce de esta definición, el estudio de este patrimonio es complejo porque en él se conjugan aspectos científicos, técnicos, culturales, económicos, estratégicos, recreativos y sociales, pero siempre en relación con procesos y elementos naturales de origen geológico. El término "geodiversidad" es un concepto joven y mal definido todavía, pero de amplia utilización y difusión, existiendo una marcada tendencia a considerarla como sinónimo de "diversidad geológica", acepción que hoy se muestra muy restrictiva [3-4]. Estos autores presentan una síntesis de la evolución del término geodiversidad en sus vertientes teórica y aplicada, concluyendo con una nueva definición de carácter integrador. A pesar de la amplia utilización y aplicaciones del término geodiversidad, son todavía muy escasos los esfuerzos realizados en el desarrollo de metodologías para su evaluación y valoración, y las existentes hasta el momento presentan carácter cualitativo. Por lo tanto, la geodiversidad es un concepto útil para la gestión y conservación del patrimonio abiótico, cuya incorporación es necesaria en políticas locales de desarrollo sostenible y de valoración de recursos naturales. Este concepto se ha considerado como idóneo para la gestión y aproximación geoecológica de espacios naturales [5]. Por otra parte, la geodiversidad es una idea vital para la gestión eficaz del patrimonio geológico [6], y por lo tanto requiere una definición muy adecuada. Muchos puntos de vista pueden ser considerados en el estudio de la geodiversidad y su comprensión debe ser diversa en sí misma [7]. Según este autor, aunque la evaluación de cada patrimonio geológico regional puede involucrar aspectos de paisaje, culturales, históricos y otros, así como la percepción humana de los objetos naturales, una evaluación del número de tipos de lugares de interés geológico (LIGs) es esencial, ya que mide el número de fenómenos geológicos representados a escala regional. La geodiversidad y el patrimonio geológico se consideran conceptos paralelos a los de biodiversidad y patrimonio biológico e íntimamente relacionados. La geodiversidad de un territorio concreto es uno de los factores esenciales que favorece su biodiversidad [8]. El patrimonio geológico es un recurso natural no renovable que constituye un bien común y forma parte inseparable del patrimonio natural y cultural de la humanidad [9]. El patrimonio geológico ya se convirtió en algo más que un recurso científico y educativo: se estima también como un recurso

económico (georecurso) de creciente interés en las estrategias de desarrollo sostenible (geoturismo), especialmente en los espacios naturales protegidos [1]. Por lo tanto, el término "georecurso" amplia el horizonte de definición respecto al de patrimonio geológico y se relaciona íntimamente con el de geodiversidad: una mayor geodiversidad en un territorio va a proporcionar, sin duda, un mayor elenco de georesursos potencialmente aprovechables en el mismo [10]. Un georecurso podría definirse como el elemento (de carácter extraíble o no), conjunto de elementos, lugares o espacios de alto valor geológico con un elevado interés científico y/o didáctico, susceptible de uso y gestión, y capaz de incrementar la capacidad de atracción del territorio en el que se ubica [11]. Existen diferentes iniciativas nacionales e internacionales de identificar y catalogar LIGs, entre las cuales destaca el proyecto "Geosites" [12] iniciado por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS). Otras iniciativas se orientan más en objetivos de valorización económica que en la conservación. La "geoconservación" define a una corriente de pensamiento que aboga por la necesidad de poner en práctica políticas activas de conservación de la geodiversidad y del patrimonio geológico, del mismo modo y con la misma intensidad que las ya avanzadas en materia de conservación del patrimonio biológico y de la biodiversidad, y, preferentemente, de manera no disociada de éstas [10]. La geoconservación es esencial para el mantenimiento del patrimonio geológico. Un "itinerario geológico" se define como la dirección y descripción de un recorrido a través del cual se divulga el conocimiento sobre algunos de los elementos básicos del patrimonio geológico de una región. A nivel mundial son numerosos los itinerarios geológicos elaborados, dentro de los que se destacan, entre otros, aquellos con fines didácticos y geoturísticos [13-29]. En nuestro país, Castellanos y Ríos [30], realizan un primer esfuerzo por desarrollar itinerarios geológicos. La Provincia Geotectónica de Santa Marta (PGSM) representa un laboratorio geológico natural de gran importancia para el entendimiento de la evolución geológica del margen noroccidental de Sur América. La gran variedad temática de sus afloramientos (de interés estratigráfico, geomorfológico, mineralógico, petrológico, tectónico, etc.), junto a la calidad de exposición, hace que tengan un gran potencial científico y didáctico. Los LIGs incluidos en el presente trabajo tienen, además de su valor científico y didáctico, un valor añadido gracias a su atractivo paisajístico. Su singularidad y belleza hace que algunos de estos lugares sean aprovechados como recurso geoturístico. El Itinerario Geológico a lo largo de la franja costera comprendida entre el Aeropuerto Internacional "Simón Bolívar" (AISB) y la Bahía de Taganga (BT) es el resultado de las investigaciones realizadas por los autores durante varios años. En este trabajo se presenta una síntesis actualizada y ampliamente ilustrada del estado de conocimiento geológico de esta región, siendo una contribución significativa para la literatura de la geología regional. El conocimiento de la geología del macizo Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) es fundamental para entender la compleja evolución de la esquina noroccidental de Sur América. Los autores presentamos este trabajo, el cual

representa una herramienta de divulgación científica de la geología de esta franja costera del Caribe Colombiano. Los resultados del presente trabajo son de importancia para especialistas en el tema, profesores y estudiantes de Geología que participen en el itinerario geológico con el fin de compartir las experiencias que científicos de las Geociencias ofrecen a los participantes. Este trabajo igualmente es el resultado de un inventario del patrimonio geológico de esta región, para lo cual fue necesario un riguroso proceso de investigación, evaluación y selección de los LIGs. Este trabajo está dividido en dos secciones. En la primera parte, se realiza una síntesis del panorama geológico actual de la SNSM, particularmente de la PGSM, contexto dentro del cual se enmarca el área de estudio, la cual constituye un laboratorio natural espectacular para el aprendizaje y entendimiento de procesos geológicos que han afectado nuestro planeta. La base fundamental de este trabajo y que justifica su publicación, son los LIGs, ilustrados a través de fotografías y esquemas de una forma didáctica y explicativa, revelando los rasgos geológicos de mayor importancia registrados a lo largo del recorrido, haciendo énfasis en los diferentes tipos de rocas que afloran en el sector de interés y la influencia que estas han tenido en combinación con los agentes geológicos que han actuado en el modelaje del paisaje actual. En la segunda parte, se presenta el itinerario geológico con la descripción de cada una de las paradas a realizar, las cuales incluyen fotografías de afloramientos y panorámicas, destacando su contexto geológico, y atendiendo especialmente a sus rasgos litoestratigráficos, mineralógicos, petrológicos, estructurales y geomorfológicos. A lo largo del recorrido visitaremos los LIGs, observaremos las rocas del basamento cristalino, las cuales preservan importantes evidencias acerca de la evolución geológica de la SNSM, y tendremos la posibilidad de admirar la fascinante geomorfología costera. Trataremos de hacer de este trabajo una guía autosuficiente para la geología de la región objeto del presente estudio, brindando información precisa sobre los LIGs a visitar, lo cual es importante para descifrar su valor científico, didáctico y cultural. Algunas de las paradas incluirán caminatas cortas. A través de ejemplos se darán explicaciones a problemas relacionados con tópicos como la evolución temprana de la corteza terrestre, los procesos magnmáticos, tectónicos y fuerzas superficiales que contribuyen a dicha evolución cortical, la relación entre metamorfismo, magmatismo y deformación, así como la historia tectonotermal que ha ocurrido en este cinturón orogénico, la fusión parcial en el desarrollo tectónico de cinturones orogénicos, incluyendo arcos magnmáticos, los procesos de exhumación y denudación tectónica que han favorecido el extenso metamorfismo retrógrado que ha afectado a las rocas metamórficas en su historia más reciente, la historia hidrotermal de los paleofluidos que han circulado a través de la corteza terrestre, las manifestaciones minerales asociadas a procesos ígneos y metamórficos, la historia de la dinámica fluvial relativamente reciente que ha contribuido en gran medida al modelado del paisaje costero. Los autores nos sentimos orgullosos de este trabajo fruto no solo de nuestra experiencia investigativa sino

también del esfuerzo de cada uno de quienes tomaron parte de las jornadas de campo, y confiamos en que su lectura puede satisfacer las expectativas de todos y contribuya a difundir los valores geopatrimoniales de las costas del Caribe Colombiano, con la esperanza de que en el lector se despierte la curiosidad y el interés en ir a visitar y conocer los LIGs que debemos respetar y conservar para nuestro beneficio y el de futuras generaciones.

2. Geología regional

La SNSM está integrada por las provincias geotectónicas de Sierra Nevada, Sevilla y Santa Marta con basamento cristalino característico y diferentes edades (Fig. 1). La Provincia Geotectónica de Sierra Nevada (PGSN) está limitada por el Lineamiento de Cesar al Este y por el Lineamiento de Sevilla al Oeste; presenta un basamento conformado por rocas metamórficas de edad Grenvilliana, las cuales han sido intruidas por rocas magmáticas de edad Jurásica [31]. La mayor parte de esta provincia geotectónica está igualmente cubierta de rocas volcánicas de la misma edad [32-36]. La Provincia Geotectónica de Sevilla (PGS) está limitada por el Lineamiento de Sevilla al Este y por la Falla de Guachaca al Oeste; presenta un basamento compuesto de granitoides miloníticos y esquistos anfibólicos y micáceos de edad Paleozoica [32-33,37]. La PGSM está limitada por la Falla de Guachaca al Este y por la línea costera del Caribe al Noroeste y se encuentra en la confluencia de las fallas de Bucaramanga – Santa Marta y Oca; está conformada por dos cinturones metamórficos [32-33], separados por un extenso cinturón de granitoides de edad Paleógena [32]. El cinturón interior está constituido por anfibolitas, esquistos bimicáceos y ortoneises (Esquistos de Gaira, EGA; Esquistos de San Lorenzo, ESA; Esquistos sin diferenciar, ESD). El cinturón exterior está constituido por anfibolitas, esquistos verdes y filitas (Esquistos de Santa Marta, ESM), que han sido considerados como posibles fragmentos alóctonos probablemente acrecionados durante el Meso-Cenozoico [32-33,37-38]. Este último fue subdividido en cuatro unidades principales con connotación estratigráfica, denominadas formaciones Concha (FCO), Punta Betín (FPB), Cinto (FCI) y Rodadero (FRO) [38], la cual es seguida en el presente trabajo.

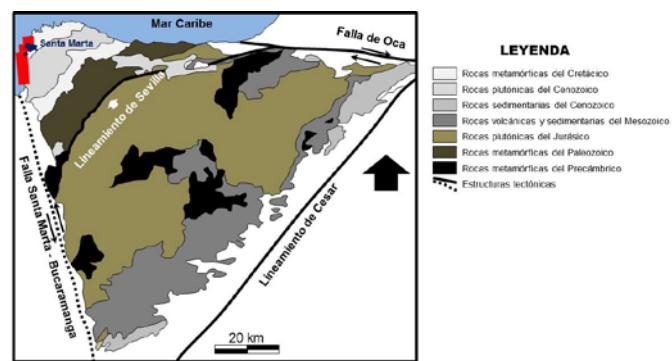


Figura 1. Mapa geológico generalizado de la SNSM (adaptado y modificado de Tschanz *et al.* [33] y Bustamante *et al.* [31]). El área en color rojo representa la franja costera objeto del presente estudio.

Fuente: Los autores.

3. Geología del itinerario geológico

Desde el punto de vista geológico regional, la franja costera comprendida entre el AISB y la BT forma parte de la PGSM, hacia el extremo Noroeste de la SNSM. A continuación, se describen los principales rasgos estratigráficos, tectónicos y geomorfológicos de este relieve costero, el cual presenta evidencias muy importantes para deducir no sólo la evolución geológica de esta importante provincia geotectónica sino también la dinámica de su evolución costera. En esta franja costera afloran rocas metamórficas de los ESA, rocas ígneas pertenecientes al Batolito de Santa Marta (BS) de edad eocena y depósitos recientes. Las rocas metamórficas pertenecientes a los ESA fueron mapeadas por Doolan [38] divididas en formaciones Concha, Punta Betín, Cinto y Rodadero en función de sus características litoestratigráficas y grado de metamorfismo. Las características geoquímicas e isotópicas de las rocas metabásicas sugieren que los protolitos fueron formados en ambientes intraoceánicos, mientras que la presencia de metasedimentos con alto contenido de cuarzo indican una fuente continental para los protolitos sedimentarios [39]. Restricciones geocronológicas para estas unidades metamórficas, incluyendo las posibles edades de sedimentación y la intrusión del BS, sugieren que la evolución metamórfica de estas rocas podría estar limitada temporalmente entre ca. 60 y 80 Ma [33,39-40]. La FCO incluye una intercalación de esquistos cuarzofeldespáticos y esquistos actinolíticos cloríticos calcáreos y delgadas intercalaciones de esquistos grafitos y talcosos. Según Cardona et al. [39], anfibolitas de grano grueso son intercaladas tectónicamente y asociadas a algunas zonas de falla principales. Según Doolan [38], el contacto con la FPB al sur es fallado y el límite entre ambas unidades es definido por la aparición de anfíbol en esta unidad geológica. Sin embargo, Bustamante et al. [31] sugieren que el contacto coincide con un incremento continuo en el metamorfismo. La FPB comprende principalmente esquistos actinolíticos y anfibolitas con menor cantidad de esquistos moscovíticos. Doolan [38] reporta la existencia de metacherts y cuarcitas. El contacto con la FCO es considerado como tectónico y relacionado al cabalgamiento hacia el sur de la FPB [40]. El grado de metamorfismo en ambas unidades no es muy diferente, alcanzando en ambos casos la facies de los esquistos verdes. La FCI es una secuencia metasedimentaria en la que predominan los esquistos moscovíticos con granate. Esta presenta contactos estratigráficos con los esquistos básicos de la FPB al norte y con las anfibolitas y los esquistos micáceos de la FRO al sur. La FRO suprayace la FCI y es intruida por el BS al sur. Esta unidad presenta predominantemente esquistos anfibólicos y anfibolitas intercalados con esquistos bimicáceos con granate. La presencia de piroxeno en las anfibolitas indica condiciones de metamorfismo de la facies de la anfibolita alta. Las rocas ígneas afloran principalmente hacia el sur del área de trabajo, tomando dirección NE, intruyendo las rocas metamórficas. En general, estas rocas presentan composición predominantemente granodiorítica, textura fanerítica

inequigranular de grano medio a grueso aumentando en dirección sur-este, con presencia de enclaves máficos de formas elipsoidales y de composición gabroide, con gran contenido de biotita, de textura fanerítica de grano fino a medio con una leve orientación de los máficos. Es común la presencia de venas cuarzofeldespáticas de textura pegmatítica. Algunos cuerpos más pequeños de rocas ígneas ocurren como silos o diques de composición andesítica, dacítica y diabásica que siguen o cortan, respectivamente, la foliación metamórfica. Las rocas sedimentarias están ausentes en el área de estudio, aunque es posible reconocer depósitos Cuaternarios relacionados con los drenajes que depositaron sedimentos en las llanuras costeras y playas formadas por el transporte de sedimentos causados por el mar. Los depósitos de playa ocurren en varios sectores, incluyendo las bahías de Taganga, Santa Marta y Gaira, los cuales son algo estratificados y semi-consolidados, con niveles de arena de grano fino y arcilla. La edad de estos depósitos ha sido asignada como Holoceno [33]. Es común la aparición de sedimentos limosos y arcillosos, principalmente en las zonas de inundación, que resultan de los períodos de lluvia intensa. Desde el punto de vista estructural, lo más característico es la existencia de la Falla Jordán, la cual es una estructura de dirección NE de tipo inverso que se bifurca en tres fallas (Taganga, Punta Betín y Santa Marta). Existen también diferentes fallas satélites y lineamientos importantes que afectan al Distrito Turístico, Cultural e Histórico de Santa Marta (DTCHSM), los cuales se manifiestan en la presencia de ganchos de falla, sillas de montar y colinas desplazadas. En general, el patrón estructural de la foliación metamórfica principal que presentan las rocas metamórficas que constituyen las diferentes formaciones presenta un rumbo de N15-50°W y un buzamiento de 20-45°SE. Las rocas metamórficas generalmente no muestran una foliación constante dentro de las unidades cartografiadas. Una crenulación sobreimpuesta sin recristalización (desarrollo de una nueva esquistosidad) está presente en todas las formaciones y estaría relacionado con la deformación más tardía durante la exhumación o fases deformacionales más jóvenes [31]. Las estructuras internas son en su mayoría de plegamiento y fractura, con áreas fuertemente plegadas que constituyen las características más destacadas. Los pliegues pueden ser paralelos, ptigmáticos o inarmónicos sin presentar una distribución específica. Una de las características estructurales más evidentes es la presencia de un gran número de venas hidrotermales que pueden presentar un espesor de escala milimétrica a métrica. Su morfología y relación con la foliación regional es igualmente variada. Con base en sus relaciones estructurales con la roca adyacente fue posible identificar varias topologías principalmente de venas de cuarzo (y en menor proporción calcita) reconocibles a escala de afloramiento. A continuación, se describen los rasgos generales de las unidades geológicas que afloran en el área de estudio. El área de estudio se caracteriza por presentar una geomorfología representada por zonas frágiles e inestables, donde actúan diversos fenómenos (olas, corrientes, mareas, descarga de sedimentos, escorrentía, deslizamientos y cambios en el

paisaje debido a la acción humana). Estas zonas, gracias a su belleza paisajística, han causado que el hombre las aproveche en beneficio propio, aunque no respetándolas y deteriorándolas, en la mayoría de los casos. A pesar de los cambios a los que está sujeta dicha área, contiene gran interés geocientífico, brindando aportes importantes al estudio de la evolución geológica de la zona. El alto relieve del interior alcanza una altitud de 200 m, mientras que las tierras bajas (llanuras costeras) se truncan en algunas zonas donde el litoral rocoso se extiende en la costa, lo cual se manifiesta en la presencia de bahías y puntas (a menudo se encuentran juntas en el mismo tramo de costa) que destacan la generación de una variedad de accidentes geográficos que le dan una gran belleza al paisaje. Las bahías se forman donde las rocas más débiles (menos resistentes) se erosionan, mientras que las rocas más fuertes y resistentes forman puntas. Por otra parte, se generan colinas y terrazas debido a que las costas bajas son interrumpidas por macizo montañoso de gran magnitud. La continua evolución de la plataforma continental, los aportes fluviales y la dinámica marina a escala local y global, están relacionados con los procesos geomorfológicos (dinámicos y estructurales) que inciden en ambientes costeros [41]. Otra condición que ayudó a que la riqueza geológica fuera mayor en el área de estudio fueron los efectos tectónicos, que han causado levantamientos y/o hundimientos, sumado a esto, en el Caribe colombiano ocurre un evento de diapirismo de lodo que aporta al tectonismo del área [42-43]. En el área de estudio, aparentemente existe un equilibrio, el cual está siendo afectado, causando un desbalance en los procesos naturales. La erosión del litoral se ha acelerado debido al calentamiento global, deteriorando la geodiversidad y con ella los ecosistemas que de ella dependen, tales como manglares, arrecifes de coral y playas estuario. Según Codignotto [44], entre los principales factores que modelan las costas se encuentran: factores geológicos (ejercen un control litológico y estructural), factores del océano (oleaje, mareas y corrientes litorales), factores propios de un sector de costa (acción eólica, acción fluvial, y acción antrópica), oscilaciones del nivel del mar de orden global (cambio climático global) y oscilaciones del nivel del mar de orden local (tectonismo-vulcanismo). Las geoformas presentes en el área de estudio se han dividido en dos zonas diferentes según su ubicación: la primera comprende la zona montañosa y de planicie aluvial, las cuales son formadas por procesos endógenos y posteriormente modificadas por factores exógenos, como la erosión, como por ejemplo la extensa planicie aluvial, donde se encuentran ubicados el DTCHSM y el corregimiento de Gaira, con pequeñas elevaciones que se presentan como parte del desgaste erosivo proveniente de la SNSM, y en la cuchilla de Taganga al norte de Santa Marta; La segunda zona comprende las geoformas costeras como playas elipsoidales (forma de bolsillo) producto de la erosión, bio-erosión e influencia marina, acantilados de playa, formación de futuras salientes, y finalmente formas antrópicas como espolones y rompeolas presentes en la bahía de Santa Marta. A continuación, se describen los diferentes geoformas identificadas: domos, acantilados, facetas triangulares,

abancos aluviales, zonas de baja inundación, llanuras costeras, manglares, dunas, playas, playas elipsoidales (playa de bolsillo), plataformas de abrasión litoral, pilares o *stacks* y *stumps*, cuevas, rompeolas. El dominio estructural presente en la zona de estudio, representado en las fallas y algunos pliegues sobre el terreno hace parte de los rasgos geomorfológicos importantes presentes en el área. Se observan algunas facetas triangulares, interrupción de la pendiente topográfica por sillas de falla, la torsión de divisorias de agua originando ganchos como en el río Manzanares, control de algunos drenajes, generación de deslizamientos y un trazado rectilíneo marcado que evidencian zonas de falla, lo que genera diaclasamiento que intensifica la erosión diferencial en el área. Las zonas más bajas son la expresión de los depósitos cuaternarios, la zona acrecional de relieve plano a onulado se asocia a la llanura de inundación y sus afluentes, donde se deposita el material aluvial erosionado de la SNSM, el cambio hacia la parte montañosa es gradual en algunos sectores y en otros abrupto.

4. Objetivos del itinerario geológico

Los objetivos específicos del itinerario geológico son: (1) Realizar el estudio y la observación de los rasgos geológicos más destacados del paisaje costero, interpretando el modelado costero; (2) Destacar la riqueza del medio geológico a partir de la ruta geológica, acercando al visitante algunos de los elementos básicos del patrimonio geológico; (3) Describir los LIGs a nivel elemental para quienes están en proceso de aprendizaje de las geociencias y complejo para profesionales de la geología; (4) Facilitar la observación de fenómenos geológicos estudiados teóricamente en el aula a través de la aplicación práctica de sus conocimientos en un laboratorio natural; (5) Crear un instrumento didáctico, dirigido a todos los interesados en las Geociencias que permita dar a conocer el valioso patrimonio geológico que forma parte del recurso natural de nuestro país; (6) Brindar una base para el desarrollo de itinerarios geológicos en otras regiones del país que sirvan no solo para divulgar su geología sino también para incentivar actitudes de conocimiento, respeto y conservación del patrimonio geológico.

5. Descripción general del itinerario geológico

El recorrido a lo largo del Itinerario Geológico (Fig. 2) cuenta con LIGs para conocer los diferentes tipos de rocas, para comprender cómo influye cada tipo de roca en la formación del paisaje que vemos en la actualidad. El desarrollo de diversas investigaciones en esta región ha contribuido al conocimiento no solo de su geología sino también de su evolución histórica. Para la realización del recorrido, se tomará la Transversal del Caribe (Ruta Nacional 90), vía paralela a la costa sobre el Mar Caribe que une a las ciudades de Turbo (Antioquia) y Paraguachón (La Guajira). Sobre esta vía, aprox. 16 km después de atravesar el municipio de Ciénaga, se encontrará una desviación a la izquierda que conduce al AISB, desde donde comenzará el recorrido, observándose los LIGs 1 y 2. A partir de la intersección entre esta desviación y la Ruta Nacional 90, se continuará hasta

el LIG 3, cerca de las instalaciones de Ecopetrol. Adelante de Ecopetrol y cruzando el puente elevado sobre la vía del ferrocarril se encontrará una desviación a la izquierda que conducirá al condominio Sierra Laguna (LIG 4), desde donde se realizará una caminata a Punta La Gloria. A 6,5 km de la desviación al terminal aéreo se encontrará la Y, a partir de la cual, la desviación a la derecha (Ruta Nacional 90) conduce al DTCHSM y la desviación a la izquierda conduce a El Rodadero, un destino turístico bastante popular entre los turistas colombianos y extranjeros. Al sur de este se visitará Playa Salguero (LIG 5). Posteriormente, se tomará la carrera 17 que conduce a El Rodadero (LIGs 6-7), atravesando el Corregimiento de Gaira, se ascenderá a el Alto de Ziruma (LIG 8) a partir del cual se descenderá hasta el Batallón “José María Córdova”, ingresándose a Santa Marta por la carrera 4 hasta alcanzar la calle 22 (LIG 9), intersección a partir de la cual se ingresará a través de una caminata a la Bahía de Santa Marta. Al final de esta bahía se encontrará la Sociedad Portuaria desde donde podrá accederse al Mirador de Punta Betín (LIG 10). El recorrido continuará a lo largo de la calle 2A hasta alcanzar la carrera 11 en el barrio Pescadito (LIG 11) desde donde se toma la vía a Taganga, la cual atraviesa el Alto de Taganga (LIG 12) y el Mirador de Taganga (LIG 13). El recorrido terminará en el LIG 14, a partir del cual se realizará una caminata por una zona acantilada en dirección a Playa Grande.



Figura 2. Mosaico de imágenes satelitales mostrando la franja costera entre el AISB y la BT

Fuente: Adaptado y modificado de Google Earth [45], así como el itinerario geológico.

LIG 1. Plataforma de abrasión elevada en Punta Brava

Localización: El AISB está ubicado a 16,5 km del DTCHSM. Aquí se llega tomando una desviación a la izquierda que parte de la Transversal del Caribe (Ruta Nacional 90), aprox. 16 km después de atravesar el municipio de Ciénaga. A este LIG se tiene acceso desde la zona de parqueo del terminal aéreo.

Coordinadas: X = 1.721.255; Y = 982.956; Z = 9 msnm

Características: Este LIG se caracteriza por la presencia de una saliente geográfica que constituye Punta Brava (Fig. 3a) en donde ocurre una plataforma de abrasión de pendiente irregular debido a la apariencia esférica como consecuencia del diaclasamiento y la meteorización que han sufrido las rocas ígneas que la constituyen (Fig. 3b), las cuales han sido cubiertas por una delgada capa de corales, los cuales son tapizados por alfombras algales de color verde y café (Figs. 3b-3c). Los corales generalmente presentan una tonalidad verde pálido. Estas rocas son de composición granodiorítica y presentan foliación metamórfica y textura fanerítica a porfírica con tamaño de grano promedio de 5 mm y fenocristales de hornblenda de hasta 0.8 cm. Localmente se observan enclaves de composición mafica de formas circulares, elipsoidales y elongados, aunque también algunas veces son de forma irregular. También se aprecia un pequeño xenolito de esquisto bimaculado de forma irregular. La granodiorita es cortada por venas de pegmatita de hasta 4 cm de espesor y geometría tabular. Pequeños acantilados bajos de hasta 1 m de altura constituidos de material no consolidado se aprecian sobre la rasa costera. Desde este aquí se observa la saliente frente al extremo sur de la pista de aterrizaje del terminal aéreo. Las Figs. 3d-3e ilustran la plataforma de abrasión mostrando venas de pegmatita de geometría tabular y 7.5 cm de espesor, la cual ha sido afectada por un diaclasamiento que ha producido su desplazamiento vena de pegmatita. Enclaves maficos de geometría usualmente elipsoidal ocurren aquí (Figs. 3f-3g), en algunos casos con desarrollo de meteorización esférica. La plataforma de abrasión termina a la altura de la entrada al parqueadero del terminal aéreo donde empieza una playa, frente a la cual se observa un enrocado de mármol para proteger la vía (Fig. 3h). Este LIG es importante desde el punto de vista estratigráfico como quiera que análogos aluviales se encuentran cubriendo una plataforma de abrasión elevada labrada en rocas del BS, definiendo una superficie de inconformidad [46]. La plataforma de abrasión elevada se extiende entre Punta Ebano y La Paz, presentando una superficie suavemente ondulada a colinada, levemente inclinada al occidente. Esta geomorfología está asociada a acantilados bajos constituidos de material no consolidado de los análogos aluviales. Dentro de los análogos aluviales se presentan colinas bajas (remanentes del BS) con pendientes suaves a moderadamente inclinadas [46]. Estos autores describen también pequeñas playas de longitud variable y poca amplitud, compuestas de arena de tamaño de grano fino a medio, las cuales desarrollan segmentos cortos y curvilíneos ubicados entre las salientes rocosas. A manera de protección de la pista de aterrizaje del terminal aéreo, se realizaron obras a fin de detener o desacelerar el proceso de erosión costera.



Figura 3. (a) Saliente geográfica de Punta Brava y plataforma de abrasión. (b) Granodiorita y alfombras algales en la plataforma de abrasión. (c) Alfombras algales sobre corales. (d) Plataforma de abrasión. (e) Granodiorita cortada por vena de pegmatita afectada por diaclasamiento de poco desplazamiento. (f) Enclave máfico de forma elipsoidal dentro de granodiorita. (g) Enclaves máficos de diferente geometría dentro de granodiorita. (h) Enrocado para la protección de la vía al terminal aéreo.

Fuente: Los autores.

LIG 2. Arrecife coralino sobre plataforma de abrasión en Punta La Loma

Localización: Punta La Loma, aprox. a 0.6 km del LIG anterior en dirección norte y por la línea de costa, frente al Centro Vacacional de la Aerocivil.

Coordenadas: X = 1.721.649; Y = 983.070; Z = 7 msnm

Características: Este LIG está caracterizado por la presencia de una saliente geográfica que constituye Punta La Loma, la cual presenta una plataforma de abrasión y arrecife coralino. Las siguientes geoformas pueden distinguirse desde aquí: abanico aluvial, colinas bajas, rasa costera, acantilados bajos y playas. El abanico aluvial corresponde a la misma unidad descrita en la parada anterior. Las colinas bajas sobresalen dentro del abanico aluvial a manera de remanentes de rocas ígneas intrusivas del BS, con pendientes suaves a moderadamente inclinadas, desarrollando crestas redondeadas y sinuosas y laderas rectilíneas con pendientes moderadamente inclinadas [46]. Las Figs. 4a-4b ilustran excelentes panorámicas de esta saliente geográfica y rasgos geológicos asociados a la zona de playa. La Fig. 4c ilustra la ocurrencia de arrecife coralino bordeando la plataforma de abrasión elevada casi horizontal. Detalles de este arrecife coralino en el extremo de la saliente geográfica y en la zona de playa se muestran en las Figs. 4e-4f. El arrecife coralino se encuentra tapizando la granodiorita (Figs. 4f-4g). En la Fig. 4h se observa una especie desconocida de coral, mientras que en la Fig. 4i se ilustra un excelente ejemplo del coral cerebro (*Colpophyllia natans*). Alrededor de esta saliente geográfica se observan acantilados bajos (hasta de 1 m de altura) constituidos por granodiorita (Fig. 5j) con socavamiento en capas y acantilados bajos (hasta de 2 m de altura) labrados sobre materiales no consolidados que constituyen el abanico aluvial (Fig. 4k). La Fig. 4l muestra una duna y estructuras eólicas. La fauna coralina está representada por la presencia de *Colpophyllia natans*, sobre la cual hay desarrollo de alfombras algales que tienen un fuerte impacto en la estructura y dinámica poblacional de comunidades arrecifales, llegando a afectar la supervivencia coralina por procesos indirectos en su metabolismo y crecimiento [47]. Las algas son un componente importante en las comunidades de arrecifes coralinos ya que juegan un sobresaliente papel ecológico y ambiental en las áreas donde estos se desarrollan [48].

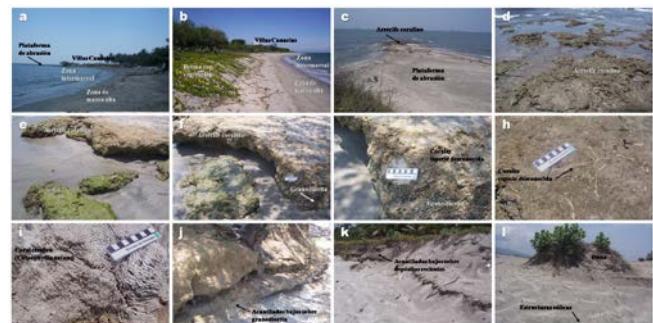


Figura 4. (a)-(b) Panorámicas a Villas Canarias y rasgos geológicos asociados a la zona de playa desde el sur y norte, respectivamente. (c) Saliente geográfica, plataforma de abrasión y arrecife coralino. (d) Detalle del arrecife coralino en el extremo de la saliente geográfica. (e) Detalle del arrecife coralino en zona de playa. (f)-(g) Arrecife coralino tapizando granodiorita. (h) Especie desconocida de coral. (i) Coral cerebro (*Colpophyllia natans*). (j) Acantilados bajos sobre granodiorita. (k) Acantilados bajos sobre depósitos recientes. (l) Duna y estructuras eólicas.

LIG 3. Pozos Colorados

Localización: Restaurante Puerto Esperanza, sobre la margen derecha de la Transversal del Caribe (Ruta Nacional 90), aprox. 4.0 km adelante de la desviación que conduce al AISB y 0.45 km antes de la portería del Terminal Marítimo de Pozos Colorados de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL).

Coordenadas: X = 1.726.297; Y = 983.690; Z = 14 msnm

Características: Desde este LIG es posible apreciar la ocurrencia de las siguientes geoformas, definidas por Idárraga et al. [46]: montañas con pendientes fuertemente inclinadas (alturas hasta de 800 m), abanicos aluviales, llanura costera y colinas altas con pendientes moderada a fuertemente inclinada. Las montañas dominan la parte oriental de la zona de estudio como un cinturón continuo compuesto por rocas de composición granodiorítica del BS con variaciones transicionales a monzogranito y tonalita, de grano grueso y predominantemente alotriomórfico, a veces orientado localmente, en facies definidas por variaciones en el tamaño de grano. Asociado a él se observan pequeños cuerpos graníticos satélites, diques pegmatíticos emplazados linealmente y segregaciones hornbléndicas zonales al interior del orógeno, tal como lo reportan en un estudio previo Mejía et al. [49]. Según Duque-Trujillo et al. [50], es común encontrar enclaves máficos distribuidos a lo largo del cuerpo, y en menor cantidad grandes cuerpos de hornblenditas pegmatíticas (cumulatos de horblenda), indicando una compleja historia magmática con mezcla y recirculación de materiales desde las partes más inferiores de la cámara magmática. Datos isotópicos indican que el magmatismo que originó este batolito es el producto de la mezcla de fuentes manto derivadas con fuentes corticales, lo cual ha sido previamente reportado en los Andes colombianos [35]. En este sector se aprecia una foliación magmática similar a la reportada por González [51], quien sugiere que esta podría estar asociada al aplastamiento general de los bordes del cuerpo intrusivo. La roca predominante corresponde a una granodiorita gris claro, de grano grueso (2-3 mm) y textura

fanerítica. Mineralógicamente se compone de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda, biotita, y granate en menor proporción. Presenta enclaves máficos de diferentes tamaños y formas lo que nos indica posibles etapas tardías de cristalización (Figs. 5a-5f). La Fig. 5g ilustra un ejemplo de pantanos de manglar observables aquí. Las rocas intrusivas aflorantes constituyen un domo ígneo (Fig. 5h) cuyas laderas presentan baja pendiente y forma redondeada, producto de la meteorización esférica la cual se produce cuando los fragmentos angulares de roca son atacados por agua que fluye a través de diaclasas, los fragmentos tienden a tomar una forma esférica. La llanura costera (Fig. 5i) que se observa aquí es una unidad de relieve muy plano con pendientes menores a 5°, la cual se extiende desde el sector de La Paz hacia el norte como una franja estrecha paralela a la costa, con una amplitud promedio de 400 m, que alcanza aprox. 2 km en Pozos Colorados. Está limitado hacia el mar por playas y hacia el continente por abanicos aluviales. Esta unidad está conformada por depósitos fluviolacustres, coluviales y de llanuras de inundación antiguas de posible edad plio-cuaternaria. Las colinas altas con pendientes moderadas a fuertemente inclinadas representan geoformas con alturas hasta de 125 m, cuya principal característica es la presencia de crestas redondeadas y vertientes convexas de pendientes moderadas a fuertes (de 10-20°). Esta unidad está conformada por rocas ígneas del BS. En los alrededores de este LIG se aprecian zonas de material granítico alterado y no movilizado, es decir, un suelo residual arenoso ligeramente compacto, el cual es muy vulnerable a la erosión, dentro de las cuales se destacan zonas con roca granítica fresca.

En Pozos Colorados se ha reportado la existencia de salinas desde tiempos prehispánicos [52]. El mar muy probablemente cubría parte del sitio o quizás la presencia de *Crassotrea rhizophora* en algunos sitios revela que las zonas adyacentes a estos sitios eran probablemente un manglar.

LIG 4. Lagos del Dulcino

Localización: A este LIG se encuentra a 2.0 km del anterior, tomando la desviación a la izquierda que conduce al Condominio Sierra Laguna (sector Lagos del Dulcino) a partir de la Transversal del Caribe (Ruta Nacional 90) luego de cruzar el puente sobre la vía férrea. El acceso a la playa se realiza ingresando a través de este condominio. Una vez en la playa se realiza una caminata al Cerro La Gloria.

Coordenadas: X = 1.727.586; Y = 982.507; Z = 15 msnm

Características: Rasgos geológicos de interés a lo largo de una caminata que conduce al Cerro La Gloria son ilustrados en la Fig. 6. Aquí es posible apreciar las siguientes unidades geomorfológicas: llanura costera, cordón de dunas, pantanos de manglar, playas, acantilados y colinas altas. Al comenzar la caminata en dirección al Cerro La Gloria se observará una llanura costera (Fig. 6a), la cual es una unidad de relieve muy plano con pendientes menores a 5° que está limitada hacia el mar por playas y al este y norte por colinas altas. Esta unidad está conformada por depósitos fluviolacustres, coluviales y de llanuras de inundación antiguas de posible edad plio-cuaternaria [46]. Las zonas próximas al mar cuando se da el fenómeno



Figura 5. (a-b) Diaclasamiento y enclaves máficos en roca ígnea intrusiva de composición granodiorítica. (c-e) Enclaves máficos de diferente composición en granodiorita. (f) Pantanos de manglar. (g) Domo en colina alta. (h) Llanura costera limitada por colinas altas.

Fuente: Los autores.

de mar de leva, son cubiertas por agua de mar y forman lagunas temporales. Uno de los rasgos asociados a estas es la presencia de grietas de desecación (Fig. 6b) de forma poligonal causadas por la desecación de lodo. Un pequeño cordón de dunas con vegetación (Fig. 6c) se diferencia de las demás geoformas costeras en que se forman por la acción del aire y no por el agua. Igualmente, se observan aquí estructuras eólicas (dunas) y de corriente (*ripple marks*), estas últimas como consecuencia del efecto de la marea que ha originado una serie de ondulaciones perpendiculares a la dirección del fluido. Remanentes de pantanos de manglar (Fig. 6d) se observan cerca a Lagos del Dulcino, los cuales han sido intervenidos generando una pérdida notoria de sus rasgos geomorfológicos, además de haber sido rellenados generando zonas inundables que afectan la estabilidad de la costa. Las colinas altas (Figs. 6e-6f) presentan pendientes moderadas a fuertemente inclinadas, desarrollando crestas redondeadas y vertientes convexas de pendientes moderadas a fuertes (10-20°). Los procesos erosivos han desmantelado totalmente las rocas que lo cubrían, destacando actualmente estas colinas altas en el paisaje suave de la llanura costera. Estas están conformadas por rocas ígneas intrusivas del BS [33], las cuales afloran hacia el Cerro La Gloria, desarrollando un relieve en forma de domo, la cual está influenciada principalmente la erosión por escorrentía. En dirección a este cerro existe una zona acantilada con playas rocosas (Fig. 6g) originadas por la erosión de los acantilados y forman playas de bloques (diámetro > 10 cm); de cantos rodados (diámetro de 30 mm - 10 cm) y de gravas (diámetro de 2-30 mm). Aquí se presenta constantemente el desprendimiento de rocas graníticas. La erosión ha actuado sobre un acantilado bajo (Fig. 6h) con materiales poco consolidados de naturaleza conglomerática, constituidos por gravas y gravillas, de forma subredondeada a redondeada de rocas intrusivas y metamórficas, en una matriz arcillo-arenosa. En este cerro se presenta un acantilado labrado sobre rocas de composición tonalítica con textura granular gruesa y presencia de escasos enclaves máficos de grano fino y venas de pegmatita de 2-10 cm de espesor. La Fig. 6i ilustra la ocurrencia de una pequeña plataforma de abrasión frente a un acantilado cubierto por vegetación de *cactus*, en el cual se destacan el fuerte diaclasamiento de la roca (Fig. 6j), desarrollando acanaladuras (Fig. 6k) que se ensanchan en determinados puntos. El aspecto corroído de la roca sobre la



Figura 6. (a) Llanura costera. (b) Grietas de desecación. (c) Cordón de dunas costeras. (d) Pantano de manglar. (e-f) Panorámica a Cerro La Gloria y domos característicos. (g) Playa rocosa. (h) Erosión en acantilado bajo. (i) Acantilado en el cual se destaca la ocurrencia de una vegetación de cactus. (j) Intenso diaclasamiento en rocas intrusivas. (k) Acanaladuras a lo largo de diaclasas. (l) Oquedades producidas en las rocas por la acción eólica.

Fuente: Los autores.

pared del acantilado revela como la erosión eólica ha actuado desarrollando un modelado alveolar caracterizado por la presencia de oquedades, las cuales se convierten en lugares de nidificación de aves (Fig. 6l).

Un caso de particular interés es el estado de conservación de las dunas costeras. No obstante, la construcción de paseos marítimos y urbanizaciones en la parte posterior de las playas, ocupando en muchos casos antiguos cordones de dunas, elimina del balance sedimentario un gran volumen de arena que ya no podrá contribuir al equilibrio de las mismas.

LIG 5. Playa Salguero

Localización: Sobre la Ruta Nacional 90, a 1.0 km del puente que cruza la vía férrea se encontrará una Y, a partir de la cual se tomará la desviación a la izquierda que conduce a El Rodadero a lo largo de la carrera 17 hasta la intersección con la calle 24, se sigue por esta hasta la carrera 2, se sigue por esta hacia el sur hasta alcanzar la zona de playa.

Coordinadas: X = 1.728.589; Y = 982.502; Z = 4 msnm

Características: Playa Salguero (Fig. 7) se extiende desde Punta La Gloria al sur hasta la desembocadura del Río Gaira al norte, con aprox. 1.5 km de longitud y 35 m de amplitud máxima. Esta playa presenta una morfología baja y rectilínea actual, debido al proceso de regularización de la costa, así como a la construcción de edificaciones que han afectado el cordón de dunas costeras, las cuales separan la playa de la llanura costera (Fig. 7a). Es una playa abierta con algunos salientes rocosos en su trazado (Fig. 7b), los cuales representan pequeños promontorios que sobresalen y que son una extensión de las colinas altas, lo cual es debido a la interrupción de un litoral arenoso por un litoral rocoso. Las colinas altas constituyen aquí el Cerro La Gloria, desarrollando una geoforma de dirección NE, la cual limita la Playa Salguero al SW, un cordón de dunas costeras, una llanura costera y un abanico aluvial. La erosión se manifiesta en las rocas cristalinas, dando lugar a un acantilado muy definido, pero con un perfil convexo y cubierto de vegetación (Fig. 7c) en el que se observa un contacto intrusivo entre tonalita del BS y esquistos anfibólicos de los EGA (Fig. 7d),

estos últimos con una foliación muy marcada y geometría plano paralela y venas de cuarzo de poco espesor paralelas a la esquistosidad (Fig. 7e). Por otra parte, es evidente la ocurrencia de xenolitos de esquistos anfibólicos (Fig. 7f) de forma irregular dentro de la tonalita. La meteorización mecánica de estas rocas ha provocado que las rocas tiendan a seguir un plano curvo. No obstante, la meteorización química es la más importante. En algunos casos, las diaclasas están llenadas principalmente con venas de pegmatita (Fig. 7g). La llanura costera (Fig. 7h) es de poca extensión y está limitada al SE por el Cerro La Gloria, al NW por un cordón de dunas costeras y al NE por un abanico aluvial. Dentro de esta, al final de la avenida Tamacá, se encuentra la nueva sede del Instituto de Investigaciones Científicas Marinas y Costeras (INVEMAR). El cordón dunar ha sido intervenido, aunque se observan algunos remanentes adyacentes a la playa, cubiertos por escasa vegetación (Fig. 7i). El abanico aluvial está asociado al Río Gaira, cuya desembocadura (Figs. 7i-7j) representa una interface río-mar que genera pequeños cambios sobre la playa. Atravesando este río se observan pequeños afloramientos de tonalita con venas de pegmatita de grano grueso alineadas, lo cual produce un bandeados composicional de la tonalita, y pequeños lentes de esquistos anfibólicos (Fig. 7k). Venas compuestas de pegmatita y cuarzo cortan la roca intrusiva y muestran una mejor resistencia a la meteorización y erosión (Fig. 7l).

La regularización costera aún no ha eliminado todos los salientes rocosos, aunque domina la deriva y el transporte. Esta playa está caracterizada por la acumulación de sedimentos no consolidados en el borde de un cuerpo de agua entre salientes rocosos y espigones, con inclinación hacia el agua.

LIG 6. Contacto ígneo-metamórfico, El Rodadero sur

Localización: A partir de la intersección de la carrera 4 con la calle 12 de El Rodadero, se avanza a lo largo de una corta caminata hacia el sur se cruza el Parque Acuático El Rodadero.

Coordinadas: X = 1.730.157; Y = 983.424; Z = 9 msnm

Características: Desde acá se observa la panorámica del pilar Morro de Gaira, la saliente de Punta Cabeza de Negro, y las colinas aserradas características de las rocas metamórficas que afloran allí, acantilados cuyo desarrollo ha sido favorecido por la foliación, así como el complejo turístico de El Rodadero. La Falla El Rodadero (N65°E/20°W) pone en contacto las Filitas de Taganga (FTA)



Figura 7. Rasgos geológicos en Playa Salguero.

Fuente: Los autores.



Figura 8. Panorámica y esquema de la Bahía de Gaira, destacando aspectos geológicos de interés.

Fuente: Los autores.

y los EGA, originando una zona de cizalla visible en la vía Santa Marta - El Rodadero. Su expresión geomorfológica es notoria a pesar de la confusión que podrían crear las características litológicas del área. Las pendientes formadas por estas rocas metamórficas son interrumpidas por la presencia de sillas de falla. La Fig. 8 ilustra una panorámica y su esquema correspondiente en el que se destacan diferentes aspectos geológicos.

Este LIG representa una típica zona de contacto ígneometamórfico (Fig. 9), en el cual se observa una secuencia metamórfica en la que predominan esquistos anfibólicos de color verde oscuro con delgadas intercalaciones de esquistos cloríticos de color verde pálido cuya foliación metamórfica es N50°E/85°SE. Otras variedades litológicas presentes corresponden a esquistos bimicáceos. Estas rocas se correlacionan con la FRO [38] y han sido afectadas por un magmatismo félscico del BS (Fig. 9a). Numerosas venas cuarzo de geometría lenticular (Fig. 9b) y en “boudinage” (Fig. 9c) de hasta 5 y 10 cm de espesor, respectivamente, siguen la foliación metamórfica. Otras venas de cuarzo (de 1.5-5 mm de espesor) cortan la foliación metamórfica casi en forma perpendicular o a bajo ángulo y presentan localmente replegamiento. Diferentes cuerpos de granodiorita se han emplazado dentro de las rocas metamórficas, los cuales en general están dispuestos de manera concordante a la foliación metamórfica, aunque localmente pueden cortarla a bajo ángulo. La granodiorita presenta textura fanerítica de grano muy grueso y desarrolla plegamientos simétricos que presentan espesores de 2.5-20 cm y esta cortada discordantemente a alto ángulo por diques de tonalita de grano medio y color blanco amarillento que alcanzan espesores hasta de 10 cm (Figs. 9d-9e). Estos cuerpos muestran evidencia de tectonismo con desplazamiento a lo largo de microfallas normal escalonadas. La Fig. 9f muestra como estas al igual que las venas de cuarzo presentan replegamiento. Diques de diabasa de 25-50 cm de espesor cortan a bajo ángulo la foliación metamórfica, aunque localmente también se disponen de manera concordante (Fig. 9g). La Fig. 9h ilustra la ocurrencia de un dique de granodiorita de grano muy grueso de aprox. 1.5 m con foliación metamórfica y que hacia la parte central presenta una vena de pegmatita cuarzosa de grano muy grueso.

En este sector ante la problemática de erosión que sufre la zona residencial costera, se ha construido una escollera unida a tierra (o espolón en forma de T) a manera de estructura protectora de la costa a base de concreto que detendrá la inestabilidad que se presenta en la playa de El Rodadero, evitando que continúe la erosión costera en el tramo intervenido. No obstante, en muchos casos esta no es

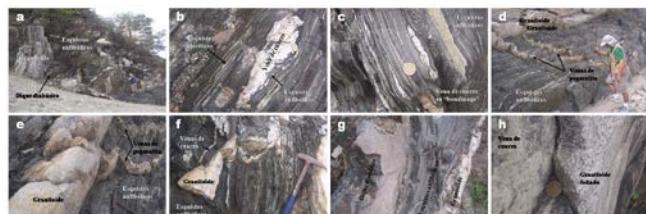


Figura 9. Rocas que caracterizan la última unidad metamórfica ubicada al sur del área de interés y que es intruida por el BS, la cual se correlaciona con la llamada por Doolan [38] FRO.

Fuente: Los autores.

una solución efectiva, constituyendo una zona riesgosa, más aun teniendo en cuenta la falta de mantenimiento de esta estructura es notoria. El auge turístico ha causado el rápido crecimiento demográfico y la concentración de población de El Rodadero, lo cual es uno de los factores más importantes en el incremento de los procesos de cambio en la zona costera y que según Rangel [53] se ha llevado a cabo en varias etapas.

LIG 7. Acantilados y plataforma de abrasión, El Rodadero norte

Localización: A partir de la intersección de la intersección de la carrera 1 con la calle 5 de El Rodadero, se avanza en dirección al norte, cruzando el puente peatonal sobre la entrada a La Escollera desde el mar, hasta el punto de partida de las embarcaciones cuyo principal destino es el Acuario y Museo del mar El Rodadero y Playa Blanca.

Coordinadas: X = 1.731.141; Y = 983.273; Z = 3 msnm

Características: La Fig. 10a ilustra una panorámica con el Morro de Gaira a la izquierda y la zona acantilada en donde comienza la caminata frente al Hotel Las Cascadas a lo largo de la zona acantilada en dirección a Playa Blanca, desde donde se observa una hermosa panorámica de la Bahía de Gaira (Fig. 10b) y un acantilado (Fig. 10c) con una pendiente de aprox. 65°, la cual representa un plano estructural definido por la foliación metamórfica (N55°E/65°SE) de esquistos bimicáceos de color gris claro de aspecto plateado y superficie de alteración de color pardo amarillento con delgadas intercalaciones de esquistos grafitos de color negro. Estas rocas presentan diferentes planos de discontinuidad: superficies de esquistosidad, diaclases y microfallas (Fig. 10d). La intersección de estos planos individualiza bloques de diverso tamaño que se encuentran en una situación inestable (también algunas de las viviendas que se apoyan sobre ellos). Venas de cuarzo de geometría lenticular y de hasta 20 cm siguen o cortan a muy bajo ángulo la foliación metamórfica, aunque localmente también la cortan casi a 90°. Venas de pegmatita de geometría lenticular, grano muy grueso y espesores hasta de 50 m siguen la foliación metamórfica. Caminando a lo largo del rumbo del plano de foliación se aprecian escarpes de paredes abruptas de la zona acantilada, procesos gravitacionales, desprendimientos de bloques al pie del acantilado, lo cual es favorecido por el patrón estructural de las rocas metamórficas. Dos fenómenos que pueden apreciarse en las rocas aflorantes es la presencia de oquedades generadas por

la disolución química del substrato rocoso favorecida por la foliación metamórfica (Fig. 10e) y por las condiciones corrosivas del agua de mar y por la acción eólica sobre las paredes de los acantilados (Fig. 10f). Alfombras algales tapizan el substrato rocoso (Fig. 10g), destacándose la presencia de cangrejos. Las pendientes estructurales de esta zona acantilada sirven de tela para el arte urbano (Fig. 10h). La saliente geográfica se caracteriza por la presencia de una vena de pegmatita de geometría lenticular a ojosa y de hasta 2.5 m de espesor encajada dentro de los esquistos descritos anteriormente (Fig. 10i). Adyacente a este se presentan numerosas venas de cuarzo concordantes a la foliación metamórfica y de hasta 1 cm de espesor. La roca aflorante en la saliente desarrolla una pequeña rasa costera de pendientes fuertes (Fig. 10j). Se observa hacia la parte baja del substrato rocoso la acción de moluscos que se adhieren a su superficie, los cuales contribuyen con el proceso de erosión de la roca. Este lugar es excelente para explicar los conceptos de dirección y buzamiento de las capas, siendo aquí muy fácil observar el plano de foliación metamórfica. La Fig. 10k ilustra la ocurrencia de esquistos bimicáceos con venas de cuarzo de geometría lenticular y de hasta 1 cm de espesor paralelas a la foliación metamórfica. Descendiendo estratigráficamente se observa un nivel de esquistos cuarzofeldespáticos con estructura ojosa a anastomosada y numerosas venas de cuarzo de geometría lenticular a tabular y de hasta 10 cm de espesor (Fig. 10l). Los acantilados son erosionados por el hidrodinamismo marino (corrientes, cambios mareales, oleaje) pero la acción del mar puede ser reforzada por algunos organismos (moluscos y corales, alfombras algales), que aceleran la caída y meteorización de las rocas. Este proceso de bioerosión [54] se puede dividir en dos fases: bioabrasión superficial y bioperforación con la participación de una gran variedad de organismos. Desde esta saliente geográfica y en dirección a Playa Blanca se observa una playa gravosa (Fig. 10m). La Fig. 10n muestra la saliente geográfica, la playa gravosa, el acantilado y la Bahía de Gaira. Caminando a lo largo de esta playa se observan bloques constituidos por intercalaciones de anfibolitas grueso granulares y esquistos actinolíticos (Fig. 10o) con algunas venas de calcita. Al final de la playa descrita anteriormente se observa un contacto entre esquistos actinolíticos y esquistos grafitosos (Fig. 10p). Aquí se observa una saliente geográfica caracterizada por la presencia de una plataforma de abrasión frente a la cual se encuentran varios *stumps* (Figs. 10q-10r). Otro detalle de la plataforma de abrasión frente a un acantilado es observado en la Fig. 10s. Una alternancia de esquistos actinolíticos de color verde parduzco y esquistos grafitosos de color gris oscuro con delgadas intercalaciones de esquistos bimicáceos de color gris claro se ilustra en la Fig. 10t. En algunos sectores, se observan cristales de actinolita que presentan una orientación al azar sobre la superficie de foliación metamórfica (Fig. 10u). La Fig. 10v ilustra una alternancia de esquistos grafitosos con esquistos bimicáceos. En los esquistos grafitosos es común observar oquedades debidas a fenómenos de disolución, así como numerosas venas de cuarzo (Fig. 10w). Al final de la caminata se observa una pequeña playa de bolsillo (Fig. 10x).

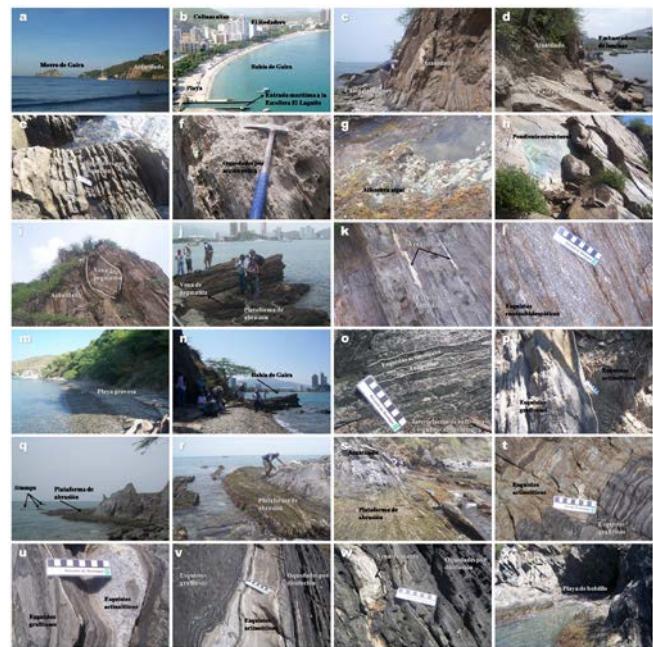


Figura 10. Zona acantilada en El Rodadero norte.
Fuente: Los autores.

La Fig. 11 ilustra la evolución de un acantilado dando lugar a una plataforma de abrasión. La acción erosiva del mar sobre las rocas metamórficas que afloran a lo largo del litoral es revelada aquí fundamentalmente como consecuencia del efecto del oleaje. Por otra parte, es importante tener en cuenta la acción del agua sobre en la disolución de la roca y, en general, la amplitud que a todas esas acciones proporciona la oscilación de las mareas. Este LIG es un excelente ejemplo para ilustrar la ocurrencia de formas de ablación, las cuales son el resultado de la acción destructora del mar sobre la roca del litoral. Dentro de estas geoformas, se distinguen dos tipos fundamentales, los acantilados y las plataformas de abrasión o rasas costeras, íntimamente ligados y que constituyen costas de ablación. La erosión igualmente ha causado las caídas de rocas, deslizamientos eventuales, acción del oleaje (grietas, formas alveolares o planares). En la Bahía de Gaira, como resultado de la subida del nivel del mar, el acantilado retrocede quedando una amplia plataforma de erosión marina, formándose cavernas, arcos y pilares. Asociado a este borde rocoso y como resultado del proceso de erosión marina se encuentra adyacente a la línea de costa algunos promontorios y un pilar (Morro de Gaira) que representan prolongaciones de Punta Cabeza de Negro.



Figura 11. Evolución de un acantilado dando lugar a una plataforma de abrasión. (a) Erosión debida al oleaje. (b) Las olas producen un socavamiento de la base del acantilado. (c) El acantilado colapsa, retrocediendo y dejando expuesta plataforma de abrasión.
Fuente: Los autores.



Figura 12. Panorámica de las dos formaciones metamórficas más cercanas al BS.

Fuente: Los autores.

Desde aquí se observa una excelente panorámica hacia el sur en la que se destacan la actividad turística en las playas de El Rodadero y su complejo hotelero, así como la Bahía de Gaira; a la derecha Cerro La Gloria (Fig. 12).

LIG 8. Alto de Ziruma, Panoramicas a El Rodadero y Santa Marta

Localización: Alto de Ziruma, sobre la vía que va de El Rodadero a Santa Marta.

Coordenadas: X = 1.732.314; Y = 985.079; Z = 103 msnm

Características: Desde este LIG se pueden obtener dos excelentes panorámicas a El Rodadero y Santa Marta. La panorámica hacia El Rodadero (Fig. 13a) permite apreciar la Bahía de Gaira, El Rodadero y un abanico aluvial, el cual está rodeado de colinas altas. La panorámica hacia Santa Marta (Fig. 13b) muestra la Bahía de Santa Marta, los pilares que representan prolongaciones de Punta Betín, una llanura costera, una cresta alargada que se desprende de las colinas altas y facetas triangulares; estas últimas evidencian la presencia de la Falla El Rodadero. Una caminata desde este alto topográfico en dirección al Batallón “José María Córdova” permite recorrer una secuencia de roca metamórfica (N46°E/55°SE) con predominio de esquistos grafitos y esquistos anfibólicos. Aquí se observa un afloramiento de esquistos grafitos con plegamiento suave (Fig. 13c). A partir de aquí en dirección al Distrito Turístico, Cultural e Histórico de Santa Marta (DTCHSM) se encontrarán excelentes afloramientos los cuales se describen a continuación. La Fig. 13d ilustra un ejemplo de nivel caracterizado por la intercalación de esquistos grafitos y esquistos anfibólicos con una superficie de foliación que presenta replegamiento. Hacia la parte superior se observa una vena de pegmatita de geometría lenticular de hasta 50 cm de espesor, la cual se dispone concordantemente con la foliación metamórfica. Un plegamiento volcado en esquistos grafitos es observado en la Fig. 13e, el cual refleja la deformación plástica que han sufrido estas rocas metamórficas. La Fig. 13f ilustra la ocurrencia de una intercalación de esquistos grafitos de color gris oscuro y bimicáceos de color gris claro, desarrollando una superficie de foliación plano paralela a levemente ondulosa. La Fig. 13g representa un nivel de esquistos anfibólicos con patrón de diaclasamiento casi perpendicular a la foliación metamórfica. Venas de pegmatita se disponen de manera concordante a la foliación metamórfica o discordante siguiendo el patrón de diaclasamiento descrito anteriormente. En la Fig. 13h se observa un detalle del plano de foliación metamórfica que presentan los esquistos anfibólicos



Figura 13. Alto de Ziruma. (a) Panorámica a El Rodadero. (b) Panorámica a Santa Marta. (c) Plegamiento suave en esquistos grafitos. (d) Intercalación de esquistos grafitos y esquistos anfibólicos. (e) Esquistos grafitos mostrando plegamiento volcado. (f) Intercalación de esquistos grafitos y bimicáceos. (g) Patrón de diaclasamiento en esquistos anfibólicos. (h) Plano de foliación metamórfica e intenso diaclasamiento en esquistos anfibólicos. (i) Venas de cuarzo concordante a la esquistosidad en esquistos anfibólicos. (j) Panorámica al Alto de Ziruma. (k) Panorámica hacia el norte. (l) Afloramiento de esquistos anfibólicos y venas de cuarzo.

Fuente: Los autores.



Figura 14. Panorámica de la Bahía de Santa Marta y el DTCHSM.

Fuente: Los autores.

así como el intenso diaclasamiento que ha afectado estas rocas metamórficas. Venas de cuarzo de geometría lenticular siguen la foliación metamórfica de los esquistos anfibólicos (Fig. 13i). Las Figs. 13j-13k presentan dos panorámicas hacia el sur en dirección al Alto de Ziruma y hacia el norte, respectivamente, donde se destacan algunos rasgos geológicos de interés. La Fig. 13l muestra un afloramiento de esquistos anfibólicos con superficie de foliación plana paralela y presencia de venas de cuarzo que se disponen de manera concordante y discordante.

La Fig. 14 ilustra una panorámica y su correspondiente esquema de la Bahía de Santa Marta y el DTCHSM en una zona deprimida rodeada por colinas altas conformadas por rocas metamórficas de la FPB [38]. Al fondo se observa la FCO [38] o FTA [33].

0.65 km después de la portería de ingreso al Batallón “José María Córdova” se cruzará el puente sobre el Río Manzanares, el cual nace en la SNSM y atraviesa el DTCHSM en sentido noreste-suroeste, por lo cual es uno de los más contaminados del departamento del Magdalena, y sobre su cauce (en el sector urbano) se pueden apreciar la acumulación de basuras, vertimiento de aguas negras y desechos líquidos en general y la construcción de viviendas extremadamente cerca al cauce del río lo que hace pensar en el peligro que para las partes representa este particular. El

fuerte impacto que se ha generado sobre este afluente ha pasado el umbral de contaminación y ya se han perdido cosas que años atrás existían en este río.

LIG 9. Camellón de Rodrigo de Bastidas

Localización: Intersección entre la carrera 1 y la calle 22, Camellón de Rodrigo de Bastidas en la Bahía de Santa Marta.

Coordinadas: X = 1.734.993; Y = 984.905; Z = 4 msnm

Características: La Fig. 15 ilustra algunos rasgos geomorfológicos observables en la Bahía de Santa Marta. Punta Betín (Fig. 15a) se ha visto deteriorado por la actividad del Puerto de Santa Marta, el cual está localizado en el extremo noroccidental de la ciudad y es considerado en la actualidad como uno de los puertos colombianos más importantes. En sus muelles tiene una intensa actividad mercantil que jalona en gran escala el crecimiento de la ciudad, estableciendo una dinámica comercial que mueve las importaciones y exportaciones. Por otra parte, este es el único puerto de la Costa Atlántica con servicio de ferrocarril, ofreciendo la posibilidad de efectuar cargues y descargues directos en los muelles. El Morro de Santa Marta y El Morrito son pilares que representan extensiones de Punta Betín (Fig. 15b). El primero de ellos vigila silencioso el proceso de llegada y salida de embarcaciones. La Fig. 15c es una panorámica hacia el sur, en donde se observan pequeñas elevaciones montañosas (colinas altas) y la bahía de Santa Marta que brindan una hermosa panorámica del paisaje dentro del cual se encuentra la ciudad, permitiendo descubrir desde una óptica distinta la inmensidad de su belleza. Las imágenes satelitales de las Fig. 15d ilustran el cauce principal del río Manzanares. Aquí se destaca la desembocadura de este río en la Bahía de Santa Marta, la barra de arena paralela a la costa y la vegetación baja que cubre las orillas del cauce. En cercanías a la desembocadura, Guzmán et al. [55] reportan la ocurrencia de depósitos recientes de terraza fluvial, los cuales corresponden al nivel más bajo, estando entre 0.5 y 1.3 m de altura con respecto al río.

El DTCHSM fue fundado el 29 de julio de 1525 por el conquistador español Rodrigo de Bastidas, es la ciudad más antigua existente de Colombia y la segunda más antigua de Suramérica. Es uno de los principales destinos turísticos del Caribe colombiano, y, su ubicación dentro de la SNSM, lo hace atractivo no solo por su rica variedad de fauna y flora sino también por sus sitios culturales e históricos. El Camellón de Rodrigo de Bastidas (Fig. 16a) es uno de los atractivos turísticos más importantes del DTCHSM, ya que es el límite entre este y el Mar Caribe, representando un agradable paseo peatonal que al recorrerlo permite apreciar



Figura 15. Vistas aéreas: (a) Punta Betín, Puerto de Santa Marta y antigua sede del INVEMAR [56]. (b) Vista aérea de Isla El Morro, Punta Betín y Bahía de Santa Marta [56]. (c) Panorámica de la Bahía de Santa Marta [56]. (d) Imagen satelital de la desembocadura del río Manzanares, barra de arena y vegetación baja [57].

Fuente: Los autores.

no solo su belleza sino también la historia que lo acompaña, como quiera que aquí se dio el desembarco de los españoles que iniciaron la fundación de la ciudad. El paseo por el camellón permitirá observar al sur la Marina Internacional de Santa Marta (Fig. 16b) y al norte el Puerto de Santa Marta (Fig. 16c). A lo largo del camellón existen diferentes obras escultóricas en homenaje a la cultura autóctona en alusión a la tradición y herencia de la etnia Tayrona y a los próceres entre las que sobresalen la estatua del fundador y conquistador Rodrigo de Bastidas, en frente de la cual se encuentra la Plaza del Libertador Simón Bolívar (Fig. 16d), sitios de gran atracción turística. Este camellón constituye un rompeolas o malecón, el cual representa una estructura de protección costera conformada por un muro longitudinal marginal y enrocado o acumulación lineal de grandes rocas que se construyó debido a la erosión de la línea costera por acción del oleaje o del clima. La Marina Internacional de Santa Marta es una intervención de la ingeniería sobre una porción de la bahía exactamente al frente de las construcciones que otrora delimitaron por el lado norte la porción de playa que la ciudad tiene frente al camellón. Un espolón (pasaje turístico norte), construido en la Marina Internacional de Santa Marta, fue abierto para el uso público con el fin de mejorar el sector turístico de la ciudad y el departamento. Los turistas podrán recorrer sin restricciones esta zona y gozar de las bellezas que brinda la bahía en plena carrera primera entre las calles 22 y 24 en el centro de Santa Marta. Este tipo de estructuras de protección contribuyen a detener la inestabilidad que se presenta en las playas, evitando que continúe la erosión costera en el tramo intervenido. No obstante, se ha generado un debate en torno a si esta ha tenido alguna influencia en la erosión costera.

LIG 10. Panorámica desde Cerro de Punta Betín

Localización: Cerro de Punta Betín. A este sitio se accede ya sea a través de la portería de acceso de la Sociedad Portuaria de Santa Marta o a lo largo de una vía que parte desde esta portería en dirección a la Ensenada de El Boquerón.

Coordinadas: X = 1.736.483; Y = 984.916; Z = 25 msnm

Características: A este sitio se llegará realizando una corta caminata desde la portería de acceso a la Sociedad Portuaria de Santa Marta (Fig. 17a). Aquí también parte una vía que conduce a la ensenada de El Boquerón. La Fig. 17b ilustra un afloramiento de esquistos talcosos con presencia de mica verde aguamarina, cuya foliación metamórfica es N74°E/85°SE, el cual se encuentra frente a la portería Sociedad Portuaria de Santa Marta. En el Cerro de Punta Betín funcionaba la antigua sede del INVEMAR. Hacia la base del cerro es posible observar una zona acantilada y playas muy estrechas. Desde aquí es posible observar la



Figura 16. (a) Camellón de Rodrigo de Bastidas [58]. (b) Marina Internacional de Santa Marta [59]. (c) Puerto de Santa Marta [59]. (d) Plaza del Libertador Simón Bolívar.

Fuente: Los autores.



Figura 17. Sociedad Portuaria de Santa Marta y antigua sede del INVEMAR.
Fuente: Los autores.



Figura 18. Rasgos geológicos en el Mirador de Punta Betín. (a-b) Zona acantilada. (c-d) Ensenada El Boquerón, playa de bolsillo y emisario submarino. (e) Acción del oleaje sobre el macizo rocoso y plataforma de abrasión. (f) Caverna. (g) Efecto de la bioerosión sobre el substrato rocoso. (h) Greenstones cloríticos.

Fuente: Los autores.

actividad que se desarrolla en la Sociedad Portuaria de Santa Marta (Fig. 17c). Por otra parte, desde aquí se obtienen dos excelentes panorámicas; una hacia el occidente, la cual permite observar los pilares de El Morro y Santa Marta que representan prolongaciones de Punta Betín (Fig. 17d), y una hacia el sur, la cual muestra la Bahía de Santa Marta, dentro de la cual se destaca el atracadero de yates de la Marina Internacional de Santa Marta, ubicado en la zona sur del Camellón de Bastidas.

Una caminata a la Ensenada de El Boquerón (Punta Betín) nos permitirá observar uno de los sitios más espectaculares del paisaje costero. Este LIG representa un excelente mirador para poder observar el modelado costero, en el cual se destacan imponentes acantilados de rocas metamórficas que limitan playas de bolsillo (Fig. 18). Punta Betín es una península rocosa de pendientes escarpadas, ubicada al norte de la Bahía de Santa Marta. Aquí es posible observar acantilados de pendientes casi verticales, así como una pequeña plataforma de abrasión y una pequeña caverna, los cuales son rasgos geomorfológicos característicos en zonas acantiladas. Además, se aprecia una playa elipsoidal o playa de bolsillo, la cual consiste en pequeñas acumulaciones de sedimento no consolidado las cuales son desarrolladas entre salientes rocosos.

El afloramiento presenta varias fracturas por las cuales se infiltraron fluidos que dieron paso a la formación principalmente de 2 familias de venas de las cuales una va paralela a la foliación de la roca y la otra la corta con un ángulo de aprox. 35°. Se pueden medir 2 direcciones de foliación una hacia la saliente N85°W/70°SW y otra hacia la playa N68°W/85°NE (Fig. 19a). Desde este mirador se identifica la unidad geológica caracterizada por la presencia de esquistos calcáreos, esquistos actinolíticos, y en menor proporción esquistos grafitos. Localmente se observa abundancia de cristales de pirita y anfibolitas grueso granulares (Fig. 19b).



Figura 19. Arriba, Al margen izquierdo de frente al mar en dirección este, un afloramiento de esquistos cloríticos-actinolíticos e ilustración de la FPB, donde se identifica una plataforma de abrasión y el inicio de formación de una caverna por procesos erosivos como resultado de la acción de las olas que socaban la base del acantilado. Abajo, Panorámica e ilustración de algunas playas de bolsillo, al margen derecho a lo lejos parte de la BT y se hace la diferenciación de las formaciones Concha y Punta Betín. Se presenta contaminación por aguas negras y desechos orgánicos. Se propone recuperar el lugar.

Fuente: Los autores.

Aquí se observa un acantilado o escarpe litoral de pendiente abrupta que ha sido modelado por la acción de la erosión litoral sobre un macizo de rocas metamórficas (*greenstones* cloríticos, anfibolitas actinolitas de grano muy fino y esquistos talcosos). El perfil de este acantilado muestra una pendiente muy fuerte, terminando en una marcada ruptura de pendiente basal que señala el paso a la plataforma rocosa, que definiría una línea de socavación más o menos profunda y continua a lo largo de la cual se destaca la ocurrencia de una pequeña caverna, la cual se ha desarrollado en los puntos más vulnerables que presenta la roca ya sea por la presencia de un intenso fracturamiento o por la acción violenta del oleaje. La actividad biológica comienza a concentrarse en la planicie y los organismos litófagos (ciertos moluscos que taladran las rocas para vivir en ellas) comienzan a habitar en la base del acantilado, perforando y dando lugar a *socaves*, los cuales son también un gran medidor de las variaciones del nivel del mar, pues la biosfera siempre está concentrada en el punto central del socave, entre las zonas de marea alta y baja. La erosión biológica o bioerosión de acantilados, la cual se manifiesta aquí, es uno de los procesos costeros más importantes que sucede en las costas del Caribe colombiano.

LIG 11. Pliegue anticlinal tumbado

Localización: Barrio Nacho Vives. Ubicados Al margen izquierdo de la vía alterna que conduce al Puerto de Santa Marta, llamada Vía del Ferrocarril, ubicados frente al túnel construido para carros y que conduce a las playas de Santa Marta, en la Carrera 11 con vía Alterna del Ferrocarril.

Coordinadas: X = 1.736.342; Y = 986.031; Z = 18 msnm

Características: Las rocas metamórficas que afloran en este LIG (Fig. 20) corresponden a una alternancia de esquistos cloríticos calcáreos de color verde pálido, esquistos grafitos de color gris oscuro y esquistos talcosos con clorita y sericitita de

color blanco verdoso pálido, cuya foliación metamórfica es N75°W/54°SW. Se presentan numerosas venillas entrecruzadas de magnesita de aprox. 1 mm de espesor. En algunos sectores, se observan numerosas venas de cuarzo de hasta 8 cm de espesor, con costras de oxidación, siguiendo la foliación metamórfica, la cual ha sido replegado desarrollando estructuras de crenulación. Venas de cuarzo lechoso de geometría lenticular o en forma de bolsadas ovaladas y hasta de 20 cm de espesor se disponen también de forma concordante a la estructura de la roca metamórfica. Localmente, cuarzo ahumado desarrolla lentes de 3-30 cm de espesor. El afloramiento presenta diaclasamiento muy pronunciando (N25°E/81°NW) cortándolo casi en rombos. Se presenta sobre el plano axial del pliegue una estructura milonítica, la cual evidencia la presencia de una falla satélite de la Falla de Jordán. No obstante, este sitio constituye un foco de desperdicios el cual presenta contaminación visual y olfativa. Aquí se observa un pliegue anticlinal tumbado de aprox. 10 m de altura cuyo plano axial con rumbo 5°SE y buzamiento 55°SW, el cual se encuentra en la entrada del barrio Pescadito en la vía Alterna del Ferrocarril, en frente del túnel que conduce a la BT. Las rocas se caracterizan por presentar microplegamiento, formando estructura cataclástica, en el flanco izquierdo del anticlinal se observó un color verdoso y venas de cuarzo totalmente alteradas presentando color rojizo, las cuales reaccionan de manera más frágil por su reología. Esta deformación afecta una zona de esquistos talcosos-grafíticos principalmente. Gracias a esta buena exposición es posible observar los esquistos con un buen desarrollo de la S_2 , paralelamente a la cual, se observan filones de cuarzo de segregación. Además, se llega a reconocer la estratificación deformada por pliegues muy apretados. El grado de apretamiento es tal que su ángulo entre flancos es de 0°; a estas estructuras se les denominan pliegues isoclinales, es decir, que tienen igual buzamiento de sus flancos. Los pliegues son contemporáneos con la S_2 , ya que su plano axial coincide con ella y están tan apretados que sus flancos se han adelgazado hasta llegar a desaparecer. Por su parte, las charnelas de los pliegues se encuentran engrosadas.

LIG 12. Alto de Taganga

Localización: Alto de Taganga, sobre la vía que conduce de Santa Marta a Taganga.

Coordenadas: X = 1.736.724; Y = 987.005; Z = 91 msnm

Características: Este LIG presenta importantes rasgos geológicos (Fig. 21). Aquí se observa un afloramiento caracterizado por la presencia de esquistos cloríticos (verde oscuro) y talcosos (verde pálido) dentro de los cuales se encuentran cuerpos de anfibolita (Fig. 21a), cuya foliación

metamórfica es N70°W/70°SW, la cual, sin embargo, varía debido al replegado e intenso fracturamiento al que han sido afectadas estas rocas. Los esquistos cloríticos presentan una foliación metamórfica de aspecto anastomosado con presencia de venas de cuarzo de geometría lenticular; unas numerosas y de poco espesor (hasta 1.5 cm) y otras escasas de hasta 10 cm de espesor. En el contacto entre estas últimas y las rocas en las que están encajadas se concentran agregados hojosos de mica de color verde aguamarina (Fig. 21b). Desde aquí parte un pequeño ramal a donde se llega a un sitio donde Metroaguas S.A. de Santa Marta está construyendo un gigantesco colector de aguas lluvias que recoge el agua de los barrios marginales que por supuesto no tienen alcantarillado, lo cual ha generado un debate en la población de Taganga, como quiera que se descargarian aguas negras en la BT, generando un gran impacto ambiental. Una panorámica aquí (Fig. 21c) permite observar la Bahía de Santa Marta, así como el paisaje característico definido por una zona plana en medio de un relieve escarpado. La zona plana corresponde a la parte baja de la cuenca del río Manzanares dominada por una terraza fluvial y sobre la cual se encuentra gran parte del DTCHSM [55]. Al fondo se observan colinas altas (unidades estructurales, definidas por estos autores) del Cerro Ziruma. Por otra parte, aquí se observa una alternancia de esquistos cloríticos y talcosos de color verde grisaceo pálido con intercalación de anfibolitas que presentan una geometría lenticular e intenso fracturamiento, asociado al trazo de la Falla de Taganga; estas presentan una estructura masiva y textura granular gruesa (Fig. 21d). Estas rocas presentan además numerosas venas de magnesita de aspecto ocre blanco amarillento que llenan superficies de fractura de forma irregular que cortan a diferentes ángulos (Figs. 21e-21f). Localmente, se observan lentes de cuarzo ahumado. Los esquistos cloríticos se caracterizan por presentar una foliación metamórfica bien definida en la que se destaca una alta concentración de mica de color verde aguamarina adyacente a venas de cuarzo de geometría lenticular y hasta 20 cm de espesor, las cuales cortan a bajo ángulo la foliación metamórfica (Figs. 21g-21h).



Figura 21. (a) Esquistos cloríticos y talcosos dentro de los cuales se encuentran cuerpos de anfibolita. (b) Vena de cuarzo siguiendo la foliación metamórfica de esquistos cloríticos. Obsérvese la concentración de agregados hojosos de mica de color verde aguamarina adyacente a la vena. (c) Panorámica de la Bahía de Santa Marta. (d) Anfibolitas que presentan una geometría lenticular e intenso fracturamiento. (e-f) Venas de magnesita cortando anfibolitas. (g-h) Esquistos cloríticos mostrando una alta concentración de mica de color verde aguamarina.

Fuente: Los autores.



Figura 20. Anticlinal tumbado y rasgos geológicos asociados.
Fuente: Los autores.

LIG 13. Mirador de Taganga

Localización: Sobre la vía que conduce de Santa Marta a Taganga.

Coordenadas: X = 1.737.054; Y = 987.059; Z = 76 msnm

Características: Desde este mirador se contempla una magnífica panorámica de la BT (Fig. 22), con un complejo sistema de ensenadas y acantilados rocosos, que hoy dan vida a un paradisiaco paisaje, la cual se encuentra protegida de los fuertes vientos alisios del norte y en su morfología se pueden apreciar varias ensenadas de tamaño mediano-pequeño en su parte Norte, contrario a lo que ocurre en la parte Sur de la Bahía donde no se observan ensenadas de tamaño considerable, hecho que puede estar posiblemente relacionado con los vientos del Norte. Sobre el margen derecho de la vía se observa un afloramiento de filitas grafitosas, las cuales presentan un fuerte replegamiento (estructura de crenulación) y presencia de numerosas venas de carbonato. Estas rocas muestran una estructura milonítica, lo que sugiere el trazo de una falla, también muestra venas de cuarzo y en especial algunas que siguen fracturas las cuales están llenas también por carbonatos. Se observan venas de cuarzo de 10 cm de espesor concordantes con la dirección de foliación la cual es N62E/64SE, sin embargo, también se presentan perpendiculares con espesores de 5 cm. Se destaca la presencia de una vena con contenido de siderita, limolita y magnesita. Siguiendo la dirección de la familia de diaclasas más predominante N74°W/35°SW; otra familia es N62°E/64°SE.

Dentro de los rasgos geomorfológicos que ocurren en la BT se destaca la Falla Taganga, las facetas triangulares y el abanico aluvial sobre el que está asentado Taganga (Fig. 23). La Falla de Taganga es una falla inversa de alto ángulo con rumbo aproximado de N75°E/85°E con una variación a N40°E/42°E cerca de Santa Marta, la cual se caracteriza por producir un fenómeno de carbonatación bastante extendido en las filitas, al igual que milonitización y cataclasis en ellas. Igualmente es una falla que se extiende hasta Santa Marta y en la zona de Taganga esta oculta por el cuaternario y haría parte de una estribación de la falla de Jordán. Se encuentran rocas fuertemente serpentinizadas y carbonatadas, con formación de grandes cristales de epidota. En el área de influencia de esta falla es considerable la presencia de talco. El relieve generado por esta falla está comprendido desde facetas triangulares, alineación de domos, colinas aserradas, laderas de alta pendiente y una excelente cuenca hídrica en épocas de lluvia. El abanico aluvial representa un depósito de detritos clásticos, de forma cónica, el cual se ha desarrollado en una zona aledaña a las porciones que delimitan los escarpes de altos morfológicos, en donde el



Figura 22. Panorámica de Taganga desde donde se pueden identificar los distintos aspectos geomorfológicos que demarcan las FTA [33] o FCO [38] su alrededor y la actividad turística en torno a ello como el Cerro Punta la Vaca, la Playa la Vaca y Playa la Baoa.

Fuente: Los autores.



Figura 23. Panorámica de Taganga donde se observa la Falla de Taganga, abanico aluvial, facetas triangulares y deslizamientos.
Fuente: Los autores.

aporte de sedimentos es mucho mayor y las corrientes son confinadas a valles angostos que se tienen dentro de una cuenca adyacente.

LIG 14. BT

Localización: El acceso a la BT se lleva a cabo a través de la única vía terrestre, que comunica en tan solo 15 minutos en vehículo al centro de Santa Marta con Taganga pasando por el barrio Pescadito, la cual se desprende a partir de la intersección entre la Avenida Alterna que conduce al Puerto de Santa Marta y la carrera 9A.

Coordenadas: X = 1.737.988; Y = 987.348; Z = 3 msnm

Características: A lo largo del malecón se emprende una caminata en dirección noroeste en donde se encontrará una típica costa acantilada. La acción del mar en las rocas que afloran aquí es de resaltar, ya que acentúa los efectos producidos por la estructura de la roca metamórfica y su diaclasamiento y meteorización, lo cual es claramente observable en los acantilados a lo largo de la línea de costa. En norte hacia la Isla de La Aguja, fuera del área de estudio, es posible apreciar en diferentes sectores algunas geoformas de erosión marina, manifestadas como pequeños promontorios, pilares, arcos, cavernas, los dos últimos generados como consecuencia de la influencia mecánica de las olas sobre segmentos de rocas que muestran zonas débiles desde el punto de vista estructural y litológico. Además de los acantilados y a lo largo de la línea costera se presentan de manera alternante playas. La Fig. 24a ilustra un ejemplo de la zona acantilada y playa rocosa que se observa al norte de Taganga. El acantilado en este sitio ha sido labrado en esquistos cloríticos; obsérvese la ocurrencia de bloques caídos (Fig. 24b). Cuerpos de anfibolita de geometría lenticular son cortados por numerosas venas de magnesita (Fig. 24c) Plegamiento en esquistos cloríticos. Los esquistos cloríticos muestran un fuerte plegamiento (Fig. 24d). Estos presentan dos foliaciones: la más penetrativa (S_1) se encuentra intensamente plegada y cortada por otra foliación, más espaciada, posterior (S_2) que da lugar al microplegamiento de la S_1 ; paralelamente a la S_1 se observan delgados niveles de cuarzo que resultan de la segregación de este mineral (Fig. 24e). Diques de composición intermedia (andesita) ocurren localmente concordante con la foliación metamórfica de los esquistos cloríticos (Fig. 24f). La secuencia metamórfica aflorante presenta una esquistosidad S_2 bien desarrollada, la cual aparece deformada por pliegues

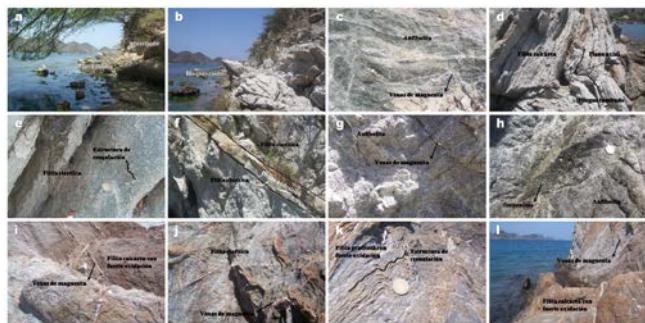


Figura 24. (a) Acantilado y playa rocosa. (b) Acantilado labrado en esquistos cloríticos y bloques caídos. (c) Anfibolita cortada por numerosas venas de magnesita. (d) Plegamiento en esquistos cloríticos. (e) Estructura de crenulación en esquistos cloríticos. (f) Dique andesítico concordante con la foliación metamórfica de los esquistos cloríticos. (g) Anfibolita gris granular cortada por venas de magnesita. (h) Serpentina en fragmentos angulares dentro de anfibolita. (i) Dos generaciones de venas de magnesita cortando esquistos cloríticos con fuerte oxidación. (j) Venas de magnesita plegadas con la foliación de los esquistos cloríticos. (k) Estructura de crenulación en esquistos grafitos. (l) Venas de magnesita cortando esquistos cloríticos con fuerte oxidación.

Fuente: Los autores.

que llevan asociado un clivaje de crenulación S_3 . Dentro de esta secuencia es común encontrar intercalaciones de cuerpos de anfibolita de grano grueso, constituidas principalmente por plagioclasa y anfíbolo, de geometría lenticular, las cuales presentan numerosas venas de magnesita cortan esta roca (Fig. 24g). Localmente es posible observar pequeños cuerpos de serpentina dentro de la anfibolita, los cuales presentan una coloración verde oscura y aspecto fragmental (Fig. 24h). Es común observar diferentes generaciones de venas hidrotermales algunas de las cuales son concordantes con la foliación de la roca metamórfica, y otras la cortan en diferentes direcciones (Fig. 24i). Un plegamiento en esquistos cloríticos ha afectado igualmente algunas venas de magnesita paralelas a la foliación metamórfica (Fig. 24j). Dentro de la secuencia metamórfica se observan localmente esquistos grafitos exhibiendo estructura de crenulación y numerosas venas de cuarzo concordantes con la foliación metamórfica (Fig. 24k). Estas rocas presentan una fuerte oxidación y numerosas venas de magnesita (Fig. 24l).

Desde esta zona acantilada se observa una panorámica hacia el sur de la BT en donde se aprecia el Mirador de Taganga y al fondo a la derecha el Morro de Santa Marta (Fig. 25). Las rocas metamórficas que afloran en los alrededores de Taganga están representadas por rocas metabásicas (esquistos actinolíticos y cloríticos, localmente grafitos) con geometría anastomosada y abundantes venas de cuarzo y calcita y/o magnesita, generalmente plegadas, concordantes con la foliación metamórfica. Estas rocas están en contacto intrusivo y en ocasiones aparentemente fallado con cuerpos de anfibolita de geometría lenticular. Se encuentran otros tipos de roca, aunque en menor proporción, anfibolitas de grano muy fino y esquistos talcosos. Es de resaltar la presencia de unas rocas masivas, pero ligeramente esquistosas, de grano medio a grueso, porfirítica, matriz cuarzofeldespática y fenocristales de un mineral negro,

hojoso de hábito prismático, el cual no fue identificado, sin embargo, es necesario resaltarlo, ya que se observa en este sector. Algunas rocas filíticas son calcáreas y contienen más clorita que sericita. La expresión geomorfológica de la unidad es muy característica debido a su foliación bien desarrollada, mucho más que la de los esquistos, además, es muy característico el color de alteración en sus taludes. Está afectada por diques de composición granodiorítica y textura fanerítica equigranular. También se encuentran metaígneos de los cuales es difícil determinar la relación genética. La Falla de Taganga es una falla inversa de alto ángulo con rumbo aproximado de N75°E/85°SE con una variación a N40°E/42°SE, cerca de Santa Marta. Se caracteriza por producir un fenómeno de carbonatación bastante extendido en las filitas, al igual que milonitización y cataclasis en ellas. Se encuentran rocas fuertemente serpentinizadas y carbonatadas, con formación de grandes cristales de epidota. En el área de influencia de esta falla es considerable la presencia de talco. Yacimientos de talco han sido reportados en los alrededores, los cuales están restringidos en forma de lentes en rocas metamórficas de las FTA. Este LIG se caracteriza por presentar cuerpos de anfibolita asociados a filitas calcáreas, afectadas por venas de cuarzo de espesores de 0.5-1 cm y de 5-10 cm que siguen un mismo patrón de diaclasamiento. Aquí, se pueden observar especies animales como erizos y peces de diferentes colores, debido a la transparencia del agua y además la actividad turística que se lleva a cabo en estas playas. Depósitos de playa ocurren aquí, los cuales son característicos para el Mar Caribe. Estos se caracterizan por presentar niveles de arenas finas de color gris y arcillas de color amarillo pardo, así como delgados niveles calcáreos, grietas de desecación en planos de estratificación y estratificación cruzada principalmente en las capas arenosas [60], son algo estratificados, semiconsolidados y semihorizontalizados. La edad de estos depósitos ha sido asignada al Holoceno [33].

La dinámica de turismo, pesquerías y fenómenos atmosféricos hacen de Taganga un sitio particular en cuanto a su riqueza marina (Fig. 26), aunque la acción antrópica impacta en el desarrollo de las comunidades marinas, y la mayoría de las ensenadas a las que se hace referencia en esta investigación se mantienen principalmente del turismo. En esta zona se presentan bosques subxerófilos de clima tropical seco con especies que poseen gran cantidad de espinas (arbustos, trupillos, cactáceas y tunas). En sitios con mayor humedad, estas comunidades se mezclan con árboles perennifolios.



Figura 25. Panorámica donde se observa el Mirador de Taganga, y al fondo a la derecha el Morro de Santa Marta.

Fuente: Los autores.

La belleza paisajística que presenta la BT y su playa hace de este lugar un sitio de gran atracción turística en donde se practica buceo o snorkel, lo cual permite admirar la fascinante variedad de corales y, por supuesto, de peces de diferentes colores, entre otras especies marinas. Durante la caminata podrás observar el paisaje y la perfecta combinación entre vegetación, vida caribeña y un inmenso cielo azul. Uno de los atractivos turísticos que presenta Taganga, a parte de su belleza natural y ubicación geográfica, es el malecón, en el cual se encuentran ubicados restaurantes de comida típica a base de los frutos del mar. Aquí, se reúnen artesanos que elaboran artesanías o elementos típicos con distintos colores y diseños para toda clase de gustos. Desde Taganga es posible tomar una lancha o realizar una caminata hacia Playa Grande. Por otra parte, Taganga constituye una de las más importantes estaciones de buceo del Caribe colombiano, como quiera que, gracias a sus hermosos arrecifes de coral, el buceo es uno de los principales deportes que allí se practica, ya que existe una gran variedad de fauna y flora marina con aguas transparentes que permiten la vista a paisajes encantadores. No obstante, a pesar de ser visitada por extranjeros, Taganga no cuenta con la infraestructura necesaria que permita prestar un excelente servicio para satisfacer las necesidades de estos. En la BT se ha venido desarrollando un turismo incipiente generando un fuerte impacto en el medio ambiente principalmente como consecuencia de la falta de planificación urbanística y la incontrolada de árboles.

6. Conclusiones

La PGSM posee un magnífico patrimonio geológico. Este patrimonio, unido al biológico, arqueológico, histórico y etnológico, forma parte de nuestro patrimonio cultural. Es deber de Administraciones Públicas, Centros de Investigación y Universidades, naturalistas, ecologistas, periodistas, educadores, entre otros, ejercer acciones para conocer, proteger, difundir y poner en valor su patrimonio geológico. Los LIGs que pertenecen a la PGSM presentan importancia petrográfica, estratigráfica, estructural, geomorfológica, entre otros. No obstante, hay mucho trabajo por hacer. Entre otros, es imprescindible desarrollar, ante la nueva situación legislativa, un proyecto de investigación específico de un inventario detallado del patrimonio geológico de esta provincia geotectónica. Este proyecto debería ser complementado con otro de puesta en valor de aquellos LIGs



Figura 26. (a) Panorámica de la BT [56]. (b) Playa de Taganga. Fuente: Los autores (c) Geoformas características. Fuente: Los autores. (d) Atardecer en Taganga. Fuente: Los autores. (e) Actividad turística. Fuente: Los autores. (f) Lancheros. Fuente: Los autores (g). Pez león y arrecifes de coral [61]. (h) Alfombras algales. Fuente: Los autores.

que tengan suficiente potencial para integrarse en la divulgación del patrimonio cultural y natural de la región, especialmente en los entornos rurales. La educación es, con diferencia, la principal herramienta para conseguir que este patrimonio geológico forme, tal y como ocurre en otros países del mundo, parte de nuestro Patrimonio Natural. Este trabajo pretende despertar la conciencia y el interés a diferentes instancias a fin de preservar nuestro patrimonio natural, del que forma parte inseparable el patrimonio geológico, lo cual representa un acto de generosidad hacia las futuras generaciones.

Agradecimientos

Queremos agradecer a las personas e instituciones que han hecho que este trabajo fuese una realidad. En primer lugar, a la Universidad Industrial de Santander, entidad que brindo el soporte financiero para el desarrollo de trabajos de campo durante 2 años en la franja costera comprendida entre el AISB y la BT, y estudiantes de la Escuela de Geología de esta institución, lo cual permitió la recolección del material geológico objeto de nuestras investigaciones. Agradecimientos especiales al personal del INVEMAR, particularmente al Director General Francisco A. Arias Isaza y a los geólogos Georgina Guzmán, Blanca Posada, Nelson Rangel, Javier Idárraga, David Morales, Juan Gómez, Dalmiro Gámez, por su colaboración, constructivos comentarios y discusiones. Los autores están más que agradecidos con las personas e instituciones mencionadas con anterioridad por el apoyo que nos brindaron.

Referencias bibliográficas

- [1] Villalobos, M., Estrategias en la protección del patrimonio geológico andaluz. En Medio Ambiente 37, Consejería de Medio Ambiente, Sevilla, 2001, pp. 36-39.
- [2] Carcavilla, L., Durán, J.J. y López-Martínez, J., Geodiversidad: Concepto y relación con el patrimonio geológico. VII Congreso Geológico de España, 2008, pp. 1299-1303.
- [3] Serrano, E. y Ruiz-Flaño, P., Geodiversidad: Concepto, evaluación y aplicación territorial. El caso de Tiermes Caracena (Soria). Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 45, pp. 79-98, 2007.
- [4] Serrano, E. and Ruiz-Flaño, P., Geodiversity. A theoretical and applied concept. Geographica Helvetica, 3, pp. 140-147, 2007.
- [5] Gordon, J.E., Dvořák, I.J., Jonasson, C., Josefsson, M., Kociánová, M. and Thompson, D.B.A., Geo-ecology and management of sensitive montane landscapes. Geografiska Annaler, 84, pp. 193-203, 2002. DOI: 10.1111/j.0435-3676.2002.00174.x
- [6] Gray, M., Geodiversity: Developing the paradigm. Proceedings of the Geologists' Association, 119, pp. 287-298, 2008.
- [7] Ruban, D.A., How diverse should be geodiversity? Reply to Knight "Evaluating geological heritage". Proceedings of the Geologists' Association, 122(3), pp. 511-513, 2011.
- [8] Voth, A., Cambios en las políticas de espacios naturales protegidos y desarrollo sostenible. Actas XX Congreso de Geógrafos Españoles, Comunicación, Sevilla, pp. 3-30, 2007.
- [9] Fernández, J.M. y Guijado, J., Geodiversidad y patrimonio geológico en Andalucía. Medio Ambiente 37, Consejería de Medio Ambiente, Sevilla, pp. 24-33, 2001.
- [10] Villalobos, M., Braga, J.C., Guijado, J. y Pérez, A.B., El inventario Andaluz de georecursos culturales: Criterios de valorización. De Re Metallica, 3, pp. 9-21, 2004.

- [11] Consejería de Medio Ambiente. Propuesta de estrategia Andaluza para la conservación de la geodiversidad. Junta de Andalucía, Universidad de Granada, 2003.
- [12] Wimbledon, W.A., Gerasimenko, N.P., Karis, L.O., Suominen, V., Johansson, C.E. y Freden, C., Proyecto GEOSITES, una iniciativa de la Unión Internacional de las Ciencias Geológicas (IUGS). La Ciencia respalda por la conservación. En: Barettoni, D., Wimbledon, W.A.P. y Gallego, E. (Eds.), Patrimonio Geológico: Conservación y gestión. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Madrid, 2000, pp. 73-100.
- [13] Palacio-Suárez, J., Patrimonio geológico. Aspectos metodológicos - Jornadas sobre Patrimonio Geológico y Desarrollo Sostenible (Soria). Ministerio de Medio Ambiente. Serie Monografías, pp. 11-21, 1999.
- [14] Cobiella-Reguera, J.L. y Cruz-Gámez, E.M., Geocuba. Espacios naturales y geología cubana – Monografías de enseñanza de las ciencias de la tierra, Serie Itinerarios 1. David Brusi, AEPECT (Ed.), Girona, 1999.
- [15] Alfaro, P., Andreu, J.M., González, J., González, M., López, F.J. y López, J.A., Itinerario geológico de la Cordillera Bética. Junta de Andalucía. Colegio Oficial de Biólogos y Caja de Ahorros del Mediterráneo, 1999.
- [16] Alfaro, P., Andreu, J.M., Delgado, J., Estévez, A., García, E., López-Arco, M., Rodríguez, M., Soria, J.M. y Yébenes, A., Itinerarios geológicos por el litoral de la provincia de Alicante. Instituto de Ciencias de la Educación, Universidad de Alicante, España, 1999.
- [17] Alfaro, P., Andreu, J.M., Estévez, A., López-Arco, M., Soria, J.M., Yébenes, A., Castro, J.M., González-Fernández, J., González-Herrero, M., López-Gómez, F.J. y López-Martín, J.A., Itinerario geológico litoral entre Benidorm y Calpe (provincia de Alicante). Instituto de Ciencias de la Educación, Universidad de Alicante, España, 1999.
- [18] Alfaro, P., Andreu, J.M., Estévez, A., Pina, J.A. y Yébenes, A., Itinerarios geológicos por la Provincia de Alicante para su utilización en Bachillerato. Instituto de Ciencias de la Educación, Universidad de Alicante, España, 2004.
- [19] Alfaro, P., Andreu, J.M., Estévez, A., López-Arco, M., Martín, I., Martín-Martín, M. y Tent-Manclús, J.E., Patrimonio geológico urbano de Alicante. En: Guillén-Mondéjar, F. y Del Ramo, A. (Eds.), El patrimonio geológico: Cultura, turismo y medio ambiente. Actas V Reunión Nacional de la Comisión de patrimonio Geológico, S.G.E., pp. 59-66, 2004.
- [20] Domingo, M., Bordonau, J., Ambrós, S., Molina, D., Pocovía, A., Lacasa, A., Martínez, A., Mata, R., Espuny, J., Rispa, J.M. y Véhí, M., Geopirineos. espacios naturales y geología pirenáica. Sector central y centrooriental – Monografías de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, Serie Itinerarios 2. David Brusi, AEPECT (Ed.), Girona, 2000.
- [21] García-Ramos, J.C., Piñuela, L., Lires, J. y Fernández, L.A., Patrimonio geológico del Jurásico asturiano. Itinerarios por los yacimientos de icnitas de dinosaurios. En: Guillén-Mondéjar, F. y Del Ramo, A. (Eds.), El patrimonio geológico: Cultura, turismo y medio ambiente. Actas V Reunión Nacional de la Comisión de patrimonio Geológico, S.G.E., pp. 85-92, 2004.
- [22] García-Ramos, J.C., Piñuela, L. y Lires, J., Guía del Jurásico de Asturias. Zinco Comunicación, Gijón, 2004.
- [23] Bastogi, M., Bentivenga, M., Brancucci, G., Canessa, A., Caputo, R., De Lotto, A., Di Gregorio, F., Fiore, A., Geremia, F., Lena, G., Lorè, A., Lunardi, F., Massoli-Novelli, R., Medaglia, S., Paliaga, G., Piedilato, S., Prosser, G. y Simone, O., Geomorphological sites aimed at becoming geological itineraries in Friuli-Venezia Giulia, Liguria, Tuscany, Marche, Abruzzo, Puglia, Basilicata, Calabria, Sardinia, Sicily. In: Panizza, V. (Eds.), Geomorphologic sites: Assessment and mapping. Workshop Proceedings, Cagliari, Italy, 2003.
- [24] Geremia, F. and Massoli-Novelli, R., The circumnavigation of the Island of Lipari to discover the coastal geomorphosites of volcanic origin (Aeolian Islands, Italy). In: Panizza, V. (Eds.), Geomorphological sites: Assessment and mapping. Workshop Proceedings, Cagliari, Italy, pp.67-68, 2003.
- [25] Geremia, F., Muscolini, E. and Randazzo, G., Geoturism as opportunity to develop a new “niche marketing” in Taormina area (Messina, Italy). In: Panizza, V. (Eds.), Geomorphological sites: assessment and mapping. Workshop Proceedings, Cagliari, Italy, pp.65-66, 2003.
- [26] Gregori, L. and Melelli, L., The geomorphosites in Umbria region: A final inventory. Geological and Geomorphological characteristics and relations with tourist request. In: Panizza, V. (Eds.), Geomorphological sites: Assessment and mapping. Workshop Proceedings, Cagliari, Italy, p. 69, 2003.
- [27] Brook, G.A., A new approach to the study of inselberg landscapes. In: Bremer H. and Jennings J. (Eds.), Inselbergs. Zeitschrift fuer Geomorphologie Supplementband, 31, pp. 138-160, 1978.
- [28] Orrú, P., Panizza, V. and Ulzega, A., Geodiversity and sustainable tourism: Protection and improvement of the submarine geomorphosites in the marine protected area of capo Carbonara (Sardinia, Italy). In: Panizza, V. (Eds.), Geomorphological sites: assessment and mapping. Workshop Proceedings, Cagliari, Italy, pp. 80-81, 2003.
- [29] Savelli, D., Nesci, O., Diligenti, A. and Stella, B., Geomorphologic itineraries in the geomorphosite of Monti del Furo (Northern Marche Apennines). In: Panizza, V. (Ed.), Geomorphological sites: Assessment and mapping. Workshop Proceedings, Cagliari, Italy, pp.87-88, 2003.
- [30] Castellanos, O.M. y Ríos, C.A., Itinerario geológico del basamento cristalino en la región suroccidental del macizo de Santander. Editorial Java. ISBN 978-958-98060-9-8, 2008, 93P.
- [31] Bustamante, C., Cardona, A., Saldarriaga, M., García-Casco, A., Valencia, V. y Weber, M., Metamorfismo de los esquistos verdes y anfibolitas pertenecientes a los Esquistos de Santa Marta, Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia): ¿Registro de la colisión entre el arco Caribe y la margen Suramericana? Boletín de Ciencias de la Tierra, 25, pp. 7-26, 2009.
- [32] Tschanz, C.M., Marvin, R.F., Cruz, B. J., Mehnert, H.H. and Cebula, G.T., Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia. Geological Society of America Bulletin, 85, pp. 273-284, 1974. DOI: 10.1130/0016-7606(1974)85<273:GEOTSN>2.0.CO;2
- [33] Tschanz, C.M., Marvin, R.F. y Cruz, B., Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia - Informe 1829. INGEOMINAS, Bogotá, 1969.
- [34] Restrepo-Pace, P.A., Ruiz, J., Gehrels, G. and Cosca, M., Geochronology and Nd isotopic data of Grenville-age rocks in the Colombian Andes: New constraints for late Proterozoic-Early Paleozoic paleocontinental reconstructions of the Americas. Earth and Planetary Science Letters, 150, pp. 427-441, 1997.
- [35] Ordóñez, O., Caracterização isotópica Rb-Sr e Sm-Nd dos principais eventos magmáticos nos Andes Colombianos. Tesis de Doctorado (inédita). Universidad de Brasilia, Brasil, 2001, 176P.
- [36] Cordani, U.G., Cardona, A., Jiménez, D.M., Liu, D. and Nutran, A.P., Geochronology of Proterozoic basement inliers in the Colombian Andes: Tectonic history of remnants of a fragmented Grenville belt. In: Vaughan, A.P.M., Leat, P.T. and Pankhurst, R.J. (Eds.), Terrane processes at the margins of Gondwana. Geological Society of London, Special Publications, 246, pp. 329-346, 2005.
- [37] Cardona, A., Cordani, U.G. and MacDonald, W.D., Tectonic correlations of pre-Mesozoic crust from the northern termination of the Colombian Andes, Caribbean region. Journal of South American Earth Sciences, 21, pp. 337-354, 2006. DOI: 10.1016/j.jsames.2006.07.009
- [38] Doolan, B.L., The structure and metamorphism of the Santa Marta area Colombia, South America. PhD. Dissertation, N.Y. State Univ., Binghamton, N.Y., USA, 1970.
- [39] Cardona, A., Valencia, V., Bustamante, C., García-Casco, A., Ojeda, G., Ruiz, J., Saldarriaga, M. and Weber, M., Tectonomagmatic setting and provenance of the Santa Marta Schists, northern Colombia: Insights on the growth and approach of Cretaceous Caribbean oceanic terranes to the South American continent. Journal of South American

- Earth Sciences, 29, pp. 784-804, 2010. DOI: 10.1016/j.jsames.2009.08.012
- [40] MacDonald, W.D., Doolan, B.L. and Cordani, U.G., Cretaceous-Early Tertiary Metamorphic K-Ar age values from South Caribbean. Geological Society of America Bulletin, 82, pp. 1381-1388, 1971.
- [41] Davis, Jr., R.A., Regional coastal morphodynamics along the United States Gulf of Mexico. Journal of Coastal Research, 13, pp. 595-604, 1997.
- [42] Duque-Caro, H., Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú - San Jacinto en el Noroccidente de Colombia. Boletín Geológico Ingeominas, 27, pp. 1-29, 1984.
- [43] Vernet, G., Maufret, A., Briceño, L. and Gayet, J., Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian margin. Tectonophysics, 202, pp. 335-349, 1992. DOI: 10.1016/0040-1951(92)90118-P
- [44] Codignotto, J.O. Geomorfología y dinámica costera. El mar Argentino y sus recursos pesqueros, 1, pp. 89-105, 1997.
- [45] Google Earth. [ONLINE]. [date of reference June 21th of 2014]. Available at: <http://earth.google.com>
- [46] Idárraga, J., Posada, B.O. y Guzmán, G., Geomorfología de la zona costera adyacente al piedemonte occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta entre los sectores de Pozos Colorados y el río Córdoba, Caribe colombiano. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras, 40 (1), pp. 41-58, 2011.
- [47] Prude, T.M. and Edmunds, P.J., Interactions between small scleractinian corals and algal turf: consequences for coral physiology. International Conference on Scientific Aspects of Coral Reef Assessment, Monitoring and Restoration, NCRI, Nova Southeastern Univ., Dania, USA: 158, 1999.
- [48] McCook, L.J., Effects of herbivores and water quality on Sargassum distribution on the Central Great Barrier Reef: Cross - shelf transplants. Marine Ecology Progress Series, 139, pp. 179-192, 1996. DOI: 10.3354/meps139179
- [49] Mejía, H.P., Santa, E.M., Ordóñez, C.O. y Pimentel, M., Consideraciones petrográficas, geoquímicas y geocronológicas de la parte occidental del Batolito de Santa Marta. DYNA, 75, pp. 223-236, 2008.
- [50] Duque-Trujillo, J.F., Orozco, T., Cardona, A., Ferrari, L., Ruiz, J. y Valencia, V., El Batolito de Santa Marta, Colombia. Registro de la instalación de una zona de subducción Paleogeno de la Placa Caribe bajo la Placa Sudamericana. Geos 28(2), Sesión Regular: Geoquímica y Petrología, GEOQP-15 CARTEL, 2008.
- [51] González, G., Mecanismo y profundidad de emplazamiento del Plutón de Cerro Cristales, Cordillera de la Costa, Antofagasta, Chile. Revista Geológica de Chile, 26, pp. 43-66, 1999. DOI: 10.4067/S0716-02081999000100003
- [52] Mancera, J.E., Caracterización ecológica de la salina artificial Pozos Colorados, Caribe Colombiano. Anales del Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betín, 19-29, pp. 121-138, 1989.
- [53] Rangel, N., Contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos y evolución reciente de la costa Caribe Colombiana. Revista Gestión y Ambiente, 12, pp. 43-56, 2009.
- [54] Prahl, H. y Cantera, Jr., Bioerosión en formaciones terciarias del Pacífico colombiano. Resúmenes XXI Congreso Nacional de Ciencias Biológicas ACCB, Cali: 25, 1986.
- [55] Guzmán, G., Posada, B.O., Idárraga-García, J. y Henao, W., Evaluación preliminar de las amenazas naturales en la cuenca del río Manzanares con énfasis en eventos fluvio-torrenciales. Informe Final de Investigación INGEOMINAS-ECOPETROL-INVEMAR, 2008.
- [56] Mi linda Santa Marta. [en línea]. [consultado en: diciembre 1 de 2014]. Disponible en: <http://milindasantamarta.blogspot.com/search/label/taganga>.
- [57] Google Earth. [online]. [date of reference May 1th of 2015]. Available at: <http://earth.google.com>
- [58] Cruceiro Restaurant. [online]. [date of reference July 1th of 2015]. Available at: <http://www.cruceirorestaurant.es.tl/Ubicaci%F3n.htm>.
- [59] Ministerio de Comercio. [online]. [date of reference February 2nd of 2015]. Available at: <http://www.crucerosok.es/page/43/>
- [60] Hernández, M., Geología de las planchas 11 Santa Marta y 18 Ciénaga. Ministerio de Minas y Energía, Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear INGEOMINAS, 1996.
- [61] Corales sin identificar. [online]. [date of reference January 31st of 2014]. Available at: http://www.tayrona.org/taganga_fauna_marina/corales_taganga_sin_identificar/corales_sin_identificar.html

J.A. Sáenz-Reyes, obtuvo su título de Geólogo en 2011 de la Universidad Industrial de Santander (Colombia). Actualmente se desempeña como Geólogo de registro en Weatherford. ORCID: 0000-0002-6674-370X

C.A. Ríos-Reyes, obtuvo su título de Geólogo en 1989 y de Esp. en Docencia Universitaria en 1995 de la Universidad Industrial de Santander (Colombia). La Universidad de Shimane (Japón) le otorgó el título de MSc. en Geología en 1999. La Universidad de Wolverhampton (Inglaterra) le otorgó el título de Dr. en Ciencias Aplicadas en 2008. Ha trabajado como profesor de tiempo completo de la Escuela de Geología (Universidad Industrial de Santander, Colombia) desde 1992. Es especialista en mineralogía, mineralogía experimental y ambiental, petrología y geoquímica de rocas metamórficas. ORCID: 0000-0002-3508-0771

O.M. Castellanos-Alarcón, obtuvo su título de Geólogo en 1999 de la Universidad Industrial de Santander (Colombia). La Universidad de Shimane (Japón) le otorgó el título de MSc. en Geología en 2001. Actualmente, es candidato a Dr. en Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia. Ha estado trabajando como profesor de tiempo completo del Programa de Geología (Universidad de Pamplona, Colombia) desde 2003. Es especialista en mineralogía, mineralogía experimental, petrología y geoquímica de rocas metamórficas. ORCID: 0000-0003-0620-0540

V/H spectral ratios associated with reverse faults of Quito city

Roberto Aguiar-Falconí ^a, Eduardo López-Moreno ^b & Diego Quizanga-Martíne ^b

^a Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de Fuerzas Amadas ESPE, Valle de los Chillos, Ecuador. rraguiar@espe.edu.ec
^b Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. eduardolopez.eslm@yahoo.es, diegoquizanga@gmail.com

Received: April 26th, 2016. Received in revised form: February 14th, 2017. Accepted: June 25th, 2017.

Abstract

Models strong ground motion developed by Abrahamson *et al.* (2013), [1] for horizontal accelerations and Gülerce *et al.* (2013), [12] for vertical accelerations, corresponding to the program Next Generation Attenuation (NGA WEST2) which has the same recognition presented accredited world. These models are applicable to cortical tectonic regime of the Metropolitan District of Quito, which is on or very close to the reverse fault segments blind called: Puengasí, Ilumbisí-La Bota, Carcelén the Inca, Bellavista-Catequilla and Tangahuilla, The Metropolitan District of Quito, is divided into five zones: south, south-central, central, north central and north, for each spectra of elastic response and spectral relationships V / H are determined considering the maximum amount that could be generated by breaking each fault segments and taking into account the soil type that exists in each zone.

Keywords: Ground motion predictions equations; response spectrum; V/H spectral ratios.

Relaciones V/H para espectros asociados a las fallas inversas de la ciudad de Quito

Resumen

Se presentan los modelos de movimiento fuerte del suelo desarrollados por Abrahamson *et al.* (2013), [1] para aceleraciones horizontales y por Gülerce *et al.* (2013), [12] para aceleraciones verticales, que corresponden al programa Next Generation Attenuation (NGA WEST2) el mismo que cuenta con acreditado reconocimiento mundial. Estos modelos son aplicables al régimen tectónico cortical del Distrito Metropolitano de Quito, la ciudad se encuentra sobre o muy próximo a los segmentos de fallas ciegas inversas denominadas: Puengasí, Ilumbisí-La Bota, Carcelén el Inca, Bellavista-Catequilla y Tangahuilla, El Distrito Metropolitano de Quito, está dividido en cinco zonas: sur, centro sur, centro, centro norte y norte, para cada una de ellas se determinan espectros de respuesta elástica y relaciones espectrales V/H, considerando la magnitud máxima que podría generarse por la rotura de cada uno de los segmentos de falla y teniendo en cuenta el tipo de suelo que existe en cada zona.

Palabras clave: Ecuación de predicción del movimiento del suelo; espectro de respuesta; relación espectral V/H.

1. Introducción

Quito puede verse afectada por dos tipos de sismos, fundamentalmente, los interplaca tipo thrust que tienen su origen en la costa y los asociados al fallamiento local. Es más en estudios de peligrosidad sísmica que se han realizado, se ha encontrado en la desagregación de la amenaza que la mayor fuente proviene de sismos cuyo epicentro se halle en un radio de 30 km., que tengan una magnitud alrededor de 6.5 y un coeficiente de incertidumbre de $\varepsilon = 2$ (la incertidumbre viene dada por $\varepsilon \sigma$; siendo σ la desviación

estándar). [3].

Se denomina espectro de control, al que se obtiene para el trío de parámetros indicados en el párrafo anterior: distancia, magnitud e incertidumbre.

Por lo tanto, el espectro de control, para las estructuras de la ciudad de Quito proviene del sistema de fallas ciegas inversas sobre las que se asienta la ciudad, donde se esperan sismos que varían entre 6.2 y 6.5 de magnitud de acuerdo al segmento de falla en que se originen. Por todo lo indicado a continuación se describe el sistema de fallas de Quito y se presentan espectros de respuesta asociados a estas fallas tanto

How to cite: Aguiar-Falconí, R., López-Moreno, E. and Quizanga-Martíne, D., Relaciones V/H para espectros asociados a las fallas inversas de la ciudad de Quito. Boletín de Ciencias de la Tierra, 42, pp. 25-35, Julio, 2017.

para la componente horizontal como para la componente vertical, de movimiento del suelo.

En la Fig. 1A, se observa el sistema de fallas de Quito (QFS) y el sistema de fallas cercano de Guayllabamba (GFS) por sus siglas en inglés.

Se puede decir también que existen tres cuencas en la ciudad, desde el sur con dirección al norte se tiene las siguientes: Machangara, Batán y la de San Antonio. [6].

En la Fig. 1B, se muestra la longitud de superficie de ruptura (SRL) de cada uno de los siguientes segmentos de falla, denominados: Puengasí, (P); Ilumbisí La Bota, (ILB); más al norte aparece la loma de Carcelén el Inca, (CEI); Bellavista Catequilla, (BC), que define el mapa neotectónico de la ciudad de Quito. [6].

Considerando el ancho de falla de cada uno de los segmentos de falla, se determinó el área del plano de falla, los mismos que se presentan en la Fig. 1C, [18]; al aplicar las ecuaciones de [14], se halla la magnitud máxima M_w , esperada ya sea en función de la longitud de ruptura L o del área de ruptura A .

$$M_w = 1.52 \log(L) + 4.4 \quad (1)$$

$$M_w = 1.0 \log(A) + 4 \quad (2)$$

En la Tabla 1 se indica el área de ruptura, la magnitud máxima hallada en base al área, la longitud de ruptura y la magnitud máxima hallada en base a la longitud. En la última fila se presenta la falla de Tangahuilla que forma parte del sistema de fallas de Quito pero en éste estudio no se la considera por encontrarse a una distancia considerable del norte de la ciudad de tal manera que un sismo generado en este segmento de falla no va a reportar ordenadas espectrales altas, lo que si ocurre cuando se generan sismos en los otros segmentos de falla, por la cercanía a la ciudad.

Es imposible definir en forma exacta el plano de falla que se daría al producirse un sismo en cualquiera de los segmentos de falla pero hay que hacerlo, para definir un modelo numérico de cálculo con el cual se generen espectros, en diferentes puntos de la ciudad, asociados a la ocurrencia de un sismo en uno de los segmentos de falla, con magnitud máxima.

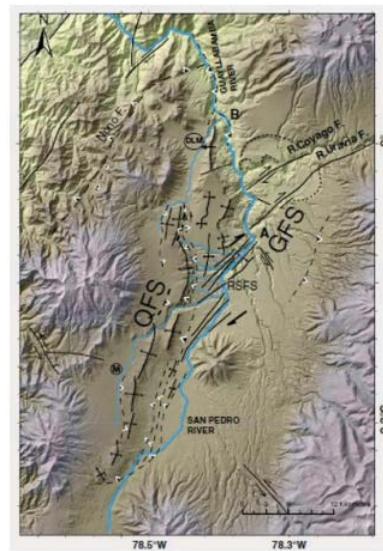
Los sismos que se van a generar en las fallas inversas de Quito son del tipo impulsivo, que son de corta duración pero con un pulso de velocidad muy alto que lo convierten en muy destructores en el campo cercano. [11].

Tabla 1.

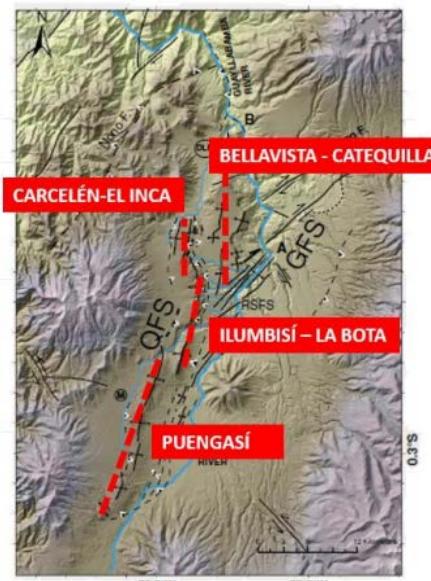
Magnitud máxima esperada en cada segmento de las fallas de Quito

Segmento de Falla	Área ruptura (km ²)	Magnitud en base al Área	Longitud de ruptura (km)	Magnitud en base a Longitud
Puengasí	259	6.4	22	6.4
ILB	176	6.2	15	6.2
CEI	82	5.9	7	5.7
BC	191	6.3	17.5	6.3
Tangahuilla	108	6.0	12	6.0

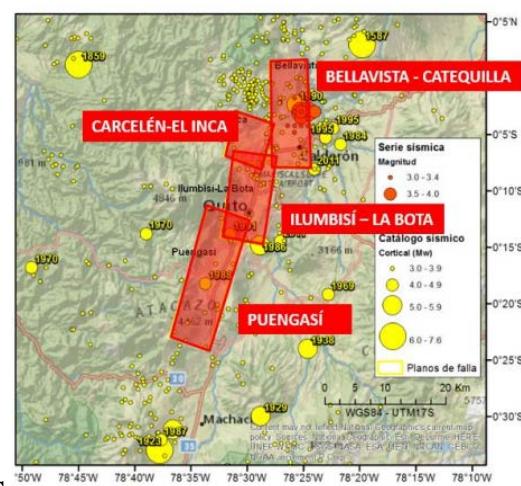
Fuente: [18]



A.



B.



C.

Figura 1. A. Nuevo mapa neotectónico de la ciudad de Quito. B. Longitud de superficie de ruptura. C. Plano de falla.

Fuente: A. B. [6] C. [18]

Tabla 2.

Período de Recurrencia, hallados con modelo de Gutenberg y Richter Modificado.

Rango de magnitud s	Período de recurrencia (años)				
	Puengasí	ILB	CEI	BC	Tangahuill a
[5.0 - 5.5)	20 - 35	18 - 30	27 - 39	18-31	23-34
[5.5 - 6.0)	62 - 87	56 - 75	85-130	58-78	65-97
[6.0 <	164 - 262	179-279			579-1016
M _{max}	1224-2190 (M _w 6.4)	610-981 (M _w 6.2)	549-952 (M _w 5.9)	908-1630 (M _w 6.3)	579-1016 (M _w 6.0)

Fuente: [18]

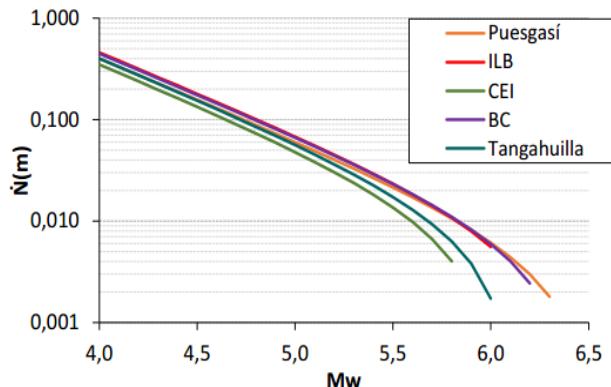


Figura 2. Tasa acumulada de sismos para los segmentos de las fallas ciegas de Quito (gráfica desarrollada con una $b=0.9$ y tasa de deslizamiento de 3.5 mm/años).

Fuente: [18]

Al estar la ciudad sobre fallas inversas, la componente vertical, de movimiento del suelo, es muy importante razón por la cual se necesita conocer la forma de los espectros, que se generarían ante la componente horizontal y vertical.

Por otra parte, se ha determinado el Período de Recurrencia, para cada segmento de falla, con el modelo de Gutenberg y Richter Modificado (GR), suponiendo un valor de b entre 0.8 – 1.0, una tasa de deslizamiento entre 3.0 y 4.0 mm/año y considerando que la falla puede romper con sismos que van desde una $M_{min}=4.0$ (lo que implica asumir que la energía liberada en la falla por terremotos de menor magnitud es ínfima en relación a la energía liberada por los terremotos de magnitud $M \geq 4.0$) y una $M_{max} =$ Magnitud (RA) indicada en la Tabla 1. Las tasas de sismos y los periodos de recurrencia asociadas a diferentes rangos de magnitudes son los mostrados en la Tabla 2. [18].

En la Fig. 2 se presenta la tasa acumulada $\dot{N}(m)$, en función de la magnitud M_w , la inversa de la tasa acumulada reporta el período de recurrencia, de ahí la importancia de esta gráfica que permite encontrar el período de recurrencia para las rupturas de diferente tamaño que puedan producirse en los diferentes segmentos de las fallas ciegas inversas de Quito.

Se encontrarán espectros asociados a la magnitud máxima indicada en la última fila de la Tabla 2, de tal manera que están asociados a los períodos de recurrencia que allí se indican. En términos generales se puede decir que el período

de recurrencia esta alrededor de los 1000 años, aunque en forma específica se tiene un rango de variación del período de recurrencia.

Al estar por el orden de los 1000 años, se puede considerar que para las estructuras de la ciudad de Quito, los espectros que se obtienen a partir de un sismo cuya fuente es uno de los segmentos de las fallas ciegas inversas, con magnitud máxima esperada, es el sismo máximo considerado (MCE), y que el sismo de diseño es el que se obtiene con el espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), o el del estudio de la microzonificación sísmica de Quito [10], que vendría a ser el sismo de diseño (DBE).

2. Materiales y métodos

Debido a que cumplen los criterios de selección de ecuaciones de predicción de movimiento del suelo (GMPE's) o modelos de movimiento fuerte, propuesto por [9] y otros autores, en el presente estudio se consideran los siguientes modelos de movimientos fuertes correspondientes al programa Next Generation Attenuation (NGA WEST2) desarrollados por Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER):

Tabla 3.

Parámetros que consideran los modelos de movimiento fuerte seleccionados.

Modelo	Abrahamson <i>et al.</i> (2013)	Gülerce <i>et al.</i> (2013)
Parámetro de la fuente sismogénica		
Magnitud (M)	X	X
Mecanismos de Falla (Función de λ)	X	X
Angulo de Buzamiento (dip)	X	X
Ancho de la ruptura (W)	X	X
Efecto Hanging-Wall (H _w)	X	X
Profundidad del plano de ruptura (Z_{TOR})	X	X
Profundidad del hipocentro (Z_{hyp})	X	X
Tipo de falla	SS, RV, NM	SS, RV, NM
Tipo de distancias		
Distancia R_X	X	X
Distancia Joyner-Boore (R_{jb})	X	X
Distancia al plano de ruptura (R_{rup})	X	X
Distancia (R_Y)	X	X
Distancia (R_{yo})	X	X
Efectos de sitio		
Velocidad de la onda de corte en los primeros 30 m (V_{s30})	X	X
Profundidad donde la velocidad de la onda de corte es de 1000m/s ($Z_{1,0}$)		X
PGA en roca, como base para la respuesta no lineal del sitio		X
Otros efectos		
Regionalización de la atenuación	Taiwan, China y Japón	Taiwan, China y Japón

Fuente: Los autores.

- Abrahamson *et al.* (2013), [1] para aceleraciones horizontales
- Gülerce *et al.* (2013), [12] para aceleraciones verticales, En la Tabla 3 se presenta las variables que consideran cada uno de los modelos, se aprecia en forma general, que existen pocas diferencias entre ellos, razón por la cual las formas espectrales tienden a ser similares.

2.1. Modelo de Abrahamson *et al.* (2013)

La ecuación del modelo de Abrahamson *et al.* (2013) [1] con la cual se halla espectros de respuesta elástica para 5% de amortiguamiento para fallas corticales es la siguiente:

$$\begin{aligned} \ln Sa(g) = & f_1(M, R_{rup}) + F_{RV}f_7(M) + F_Nf_8(M) + F_{AS}f_{11}(CR_{jb}) \\ & + f_5(Sa_{1100}, V_{s30}) \\ & + F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{yo}, W, dip, Z_{TOR}, M) \\ & + f_6(Z_{TOR}) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{s30}) \\ & + \text{Regional}(V_{s30}, R_{rup}) \end{aligned} \quad (3)$$

El significado de las funciones que intervienen en su formulación se indica a continuación:

- **Función del modelo base:**

$$f_1 = \begin{cases} a_1 + a_5(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + \\ [a_2 + a_3(M - M_1)]\ln(R) + a_{17}R_{rup}; & M > M_1 \\ a_1 + a_4(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + \\ [a_2 + a_3(M - M_1)]\ln(R) + a_{17}R_{rup}; & M_2 \leq M < M_1 \\ a_1 + a_4(M_2 - M_1) + a_8(8.5 - M_2)^2 + \\ a_6(M - M_2) + a_7(M - M_2)^2 + \\ [a_2 + a_3(M_2 - M_1)]\ln(R) + a_{17}R_{rup}; & M < M_2 \end{cases} \quad (4)$$

Donde:

$$R = \sqrt{R_{rup}^2 + c_{4M}^2} \quad (5)$$

$$c_{4M}(M) = \begin{cases} c_4; & M > 5 \\ c_4(c_4 - 1)(5 - M); & 4 < M \leq 5 \\ 1; & M \leq 4 \end{cases} \quad (6)$$

- **Función del tipo de falla:**

$$f_7(M) = \begin{cases} a_{11}; & M > 5 \\ a_{11}(M - 4)(5 - M); & 4 \leq M \leq 5 \\ 0; & M \leq 4 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_8(M) = \begin{cases} a_{12}; & M > 5 \\ a_{12}(M - 4); & 4 \leq M \leq 5 \\ 0; & M \leq 4 \end{cases} \quad (8)$$

- **Función de réplicas:**

$$f_{11}(CR_{jb}) = \begin{cases} a_{14}; & CR_{jb} \leq 5 \\ a_{14} \left[1 - \frac{CR_{jb}-5}{10} \right]; & 5 < CR_{jb} < 15 \\ 0; & CR_{jb} > 15 \end{cases} \quad (9)$$

Donde CR_{jb} es la distancia en km., desde el sitio hasta el centroide del plano de falla.

- **Función de sitio:**

$$f_5(\hat{S}a_{1100}, V_{s30}^*) = \begin{cases} (a_{10})\ln\left(\frac{V_{s30}^*}{V_{LIN}}\right) - b \ln(Sa_{1100} + c) + \\ + b \ln\left(Sa_{1100} + c \left(\frac{V_{s30}^*}{V_{LIN}}\right)^n\right); & V_{s30} < V_{LIN} \\ (a_{10} + bn)\ln\left(\frac{V_{s30}^*}{V_{LIN}}\right); & V_{s30} \geq V_{LIN} \end{cases} \quad (10)$$

Donde:

$$V_{s30}^* = \begin{cases} V_{s30}; & V_{s30} < V_1 \\ V_1; & V_{s30} \geq V_1 \end{cases} \quad (11)$$

$$V_1 = \begin{cases} 1500; & T \leq 0.5 \text{ sec} \\ \exp\left(-0.35 \ln\left(\frac{T}{0.5}\right) + \ln(1500)\right); & 0.5 \text{ sec} > T > 3 \text{ sec} \\ 800; & T \geq 3 \text{ sec} \end{cases} \quad (12)$$

- **Función de Hangin Wall:**

$$f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{yo}, dip, Z_{tor}, M) = a_{13}T_1(dip)T_2(M)T_3(R_x, W, dip)T_4(Z_{tor})T_5(R_x, R_{yo}) \quad (13)$$

$$T_1(dip) = \begin{cases} (90 - dip)/45; & dip > 30 \\ 60/45; & dip < 30 \end{cases} \quad (14)$$

$$T_2(M) = \begin{cases} 1 + a_{2HW}(M - 6.5) - 1 + \\ + a_{2HW}(M - 6.5); & M \geq 6.5 \\ 1 + a_{2HW}(M - 6.5) - \\ -(1 + a_{2HW})(M - 6.5)^2; & 5.5 < M < 6.5 \\ 0; & M \leq 5.5 \end{cases} \quad (15)$$

$$T_3(R_x) = \begin{cases} h_1 + h_2(R_x/R_y) + h_3(R_x/R_y)^2; & R_x < R_1 \\ 1 - \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1}\right); & R_1 \leq R_x \leq R_2 \\ 0; & R_x > R_2 \end{cases} \quad (16)$$

$$T_4(Z_{tor}) = \begin{cases} 1 - \frac{Z_{tor}}{100}; & Z_{tor} \leq 10 \text{ km} \\ 0; & Z_{tor} \geq 10 \text{ km} \end{cases} \quad (17)$$

$$T_5(R_x, R_{yo}) = \begin{cases} 1; & R_{yo} < R_{y1} \\ 1 - \left(\frac{R_x - R_1}{5}\right); & R_{yo} - R_{y1} < 5 \\ 0; & R_{yo} - R_{y1} \geq 5 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} R_1 &= W \cos(dip); R_2 = 3R_1; R_{y1} = R_x \tan(20); \\ h_1 &= 0.25; h_2 = 1.5; h_3 = -0.75 \end{aligned} \quad (19)$$

Si no se ha medido la distancia R_{yo} el término T_5 puede ser calculado mediante la ecuación:

$$T_5(R_{jb}) = \begin{cases} 1; & R_{jb} = 0 \\ 1 - \left(\frac{R_{jb}}{30}\right); & R_{jb} < 30 \\ 0; & R_{jb} \geq 30 \end{cases} \quad (20)$$

• **Función de profundidad de falla Z_{TOR}**

$$f_6(Z_{TOR}) = \begin{cases} a_{15} \frac{Z_{TOR}}{100}; & Z_{TOR} < 20 \text{ km} \\ a_{15}; & Z_{TOR} \geq 20 \text{ km} \end{cases} \quad (21)$$

Z_{TOR} es la profundidad al borde superior del plano de ruptura.

• **Función de profundidad de cuenca:**

$$f_{10}(Z_1, V_{s30}) = \begin{cases} a_{43} \ln\left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_1 ref + 0.01}\right); & V_{s30} \leq 200 \\ a_{44} \ln\left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_1 ref + 0.01}\right); & 200 < V_{s30} \leq 300 \\ a_{45} \ln\left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_1 ref + 0.01}\right); & 300 < V_{s30} \leq 500 \\ a_{46} \ln\left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_1 ref + 0.01}\right); & 500 < V_{s30} \end{cases} \quad (22)$$

Dónde:

$$Z_{1,ref} = \frac{1}{1000} \exp\left(\frac{-7.67}{4} \ln\left(\frac{V_{s30}^4 + 610^4}{1360^4 + 610^4}\right)\right) \text{ Para California} \quad (23)$$

$$Z_{1,ref} = \frac{1}{1000} \exp\left(\frac{-5.23}{2} \ln\left(\frac{V_{s30}^4 + 412^2}{1360^4 + 412^2}\right)\right) \text{ Para Japón} \quad (24)$$

Donde Z_1 es la profundidad donde la velocidad de la onda de corte es de 1000 m/s., si se desconoce esta cantidad se puede considerar $Z_1 = Z_{1,ref}$

• **Función de regionalización**

$$\begin{aligned} Reg(V_{s30}, R_{rup}) = & F_{TW}(f_{11}(V_{s30}) + a_{25}R_{rup}) \\ & + F_{CN}(a_{28}, R_{rup}) \\ & + F_{JP}(f_{12}(V_{s30}) + a_{29}R_{rup}) \end{aligned} \quad (25)$$

Dónde:

$$f_{11}(V_{s30}) = a_{31} \ln\left(\frac{V_{s30}}{V_{Lin}}\right) \quad (26)$$

$$f_{12}(V_{s30}) = \begin{cases} a_{36}; & V_{s30} < 200 \\ a_{37}; & 200 \leq V_{s30} < 300 \\ a_{38}; & 300 \leq V_{s30} < 400 \\ a_{39}; & 400 \leq V_{s30} < 500 \\ a_{40}; & 500 \leq V_{s30} < 700 \\ a_{41}; & 700 \leq V_{s30} < 1000 \\ a_{42}; & V_{s30} \geq 1000 \end{cases} \quad (27)$$

• **Modelo aleatorio**

La desviación estándar para intra-eventos se expresa como una función dependiente de la magnitud mediante la siguiente expresión:

$$\Phi_{A,L}(M) = \begin{cases} s_1; & M < 4 \\ s_1 \frac{s_1 - s_2}{2} (M - 4); & 4 \leq M \leq 6 \\ s_2; & M > 6 \end{cases} \quad (28)$$

La desviación estándar para inter-eventos así mismo se expresa como una función dependiente de la magnitud mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_{A,L}(M) = \begin{cases} s_3; & M < 5 \\ s_3 \frac{s_4 - s_3}{2} (M - 4); & 5 \leq M \leq 7 \\ s_4; & M > 7 \end{cases} \quad (29)$$

La desviación estándar en la respuesta no lineal del suelo depende de la magnitud del evento, esta variabilidad depende del movimiento en roca, por lo que es necesario estimar la desviación estándar en roca, para hallar este valor los autores han empleado las siguientes ecuaciones:

$$\Phi_B(M, T) = \sqrt{\Phi_{A,L}^2(M, T) - \Phi_{Amp}^2(T)} \quad (30)$$

Dónde:

Φ_B : La desviación estándar en roca.

$\Phi_{A,L}$: La desviación estándar para intra-eventos (lineal), que está en función de la magnitud (M) y el periodo (T).

Φ_{Amp} : La desviación estándar de la amplificación del sitio. Asumida como 0.4 para todos los períodos basados en [Kamai, 2013]

Para la variabilidad inter eventos la desviación estándar en roca es la misma observada en la variabilidad del rango lineal entonces:

$$\tau_B(M, T) = \tau_{A,L}(M, T) \quad (31)$$

Los autores para considerar los efectos de la no linealidad del suelo consideraron las siguientes ecuaciones:

Para intra-eventos:

$$\Phi(T, M, Sa_{1100}, V_{s30}) = \left[\Phi_B^2(M, T) \left(1 + \frac{\partial \ln \Phi_B(T, M, Sa_{1100}, V_{s30})}{\partial \ln Sa_{1100}} \right)^2 + \Phi_{Amp}^2(T) \right]^{1/2} \quad (32)$$

Para inter eventos:

$$\begin{aligned} \tau(T, M, Sa_{1100}, V_{s30}) = & \\ \tau_B(M, T) \left(1 + \frac{\partial \ln \Phi_B(T, M, Sa_{1100}, V_{s30})}{\partial \ln Sa_{1100}} \right) & \end{aligned} \quad (33)$$

Dónde:

$$\frac{\partial(T, M, Sa_{1100}, V_{S30})}{\partial \ln Sa_{1100}} = \begin{cases} 0 & Si V_{S30} \geq V_{Lin} \\ \frac{-b(T) Sa_{1100}}{Sa_{1100} + c} + \frac{-b(T) Sa_{1100}}{Sa_{1100} + c \left(\frac{V_{S30}}{V_{Lin}} \right)^n} & Si V_{S30} < V_{Lin} \end{cases} \quad (34)$$

Las Tablas de los coeficientes (a_1, a_2, \dots etc.) de las ecuaciones que no han sido descritos se pueden encontrar en la referencia [1]

• Limitaciones del modelo

El alcance del modelo ASK13 es el siguiente:

- $3.0 \leq M \leq 8.5$ para sismos generados en cualquier tipo de falla cortical.
- $Z_{TOR} \leq 20\text{km}$
- $0 \leq R_{RUP} \leq 300 \text{ km}$
- $180 \text{ m/s} \leq V_{S30} \leq 1500 \text{ m/s}$

Aunque según recomendaciones de los autores no debería usarse un V_{S30} menor a 190 m/s.

2.2. Modelo de Gülerce et al. (2013)

La forma funcional del modelo de Gülerce et al. (2013) [12] es consistente con la forma funcional utilizada por Abrahamson et al. (2013), con las siguientes excepciones:

- La respuesta no lineal de sitio no está incluido
- La profundidad a la roca madre no está incluido.

Por lo tanto en esta sección se presentará únicamente las ecuaciones que difieren del modelo de Abrahamson et al. (2013), ya presentado.

La ecuación del modelo de Gülerce et al. (2013) con la cual se halla espectros de respuesta elástica para 5% de amortiguamiento es la siguiente:

$$\begin{aligned} \ln Sa(g) = & f_1(M, R_{rup}) + F_{RV}f_7(M) + \\ & F_Nf_8(M) + F_{AS}f_{11}(CR_{jb}) + f_5(V_{S30}) + \\ & F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{yo}, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + \\ & Regional(R_{rup}) \end{aligned} \quad (35)$$

*Variación de la ecuación (3).

• Función del modelo base

$$f_1 = \begin{cases} a_1 + a_5(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + \\ [a_2 + a_3(M - M_1)]\ln(R) + a_{17}R_{rup}; & M > M_1 \\ a_1 + a_4(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + \\ [a_2 + a_3(M - M_1)]\ln(R) + a_{17}R_{rup}; & M_2 \leq M < M_1 \\ a_1 + a_4(M_2 - M_1) + a_8(8.5 - M_2)^2 + a_6(M - M_2) \\ + [a_2 + a_3(M_2 - M_1)]\ln(R) + a_{17}R_{rup}; & M < M_2 \end{cases} \quad (36)$$

*Variación de la ecuación (4).

Dónde:

$$R = \sqrt{R_{rup}^2 + c_4^2} \quad (37)$$

*Variación de la ecuación (5).

• Función de sitio

$$f_5(V_{S30}^*) = (a_{10})\ln\left(\frac{V_{S30}^*}{V_{Lin}}\right) \quad (38)$$

*Variación de la ecuación (10).

• Función de Hangin Wall

$$\begin{aligned} R_1 &= W\cos(dip); R_2 = 4R_1; R_{y1} = R_x\tan(20); \\ h_1 &= 0.25; h_2 = 1.5; h_3 = -0.75 \end{aligned} \quad (39)$$

*Variación de la ecuación (19).

• Función de regionalización

$$Reg(R_{rup}) = F_{TW}(a_{25}R_{rup}) + F_{CN}(a_{28}R_{rup}) + F_{JP}(f_{12} + a_{29}R_{rup}) \quad (40)$$

*Variación de la ecuación (25).

• Modelo aleatorio

No se considera la desviación estándar en la respuesta no lineal del suelo, por tanto no son aplicables las ecuaciones (30) a la (34).

Las Tablas de los coeficientes (a_1, a_2, \dots etc.) de las ecuaciones que no han sido descritos se pueden encontrar en la referencia [12]

3. Metodología

El distrito metropolitano de Quito tiene 65 parroquias de las cuales 32 conforman la zona urbana de la ciudad de Quito. El área de estudio está limitada únicamente a estas parroquias que conforman la parte urbana de la ciudad.

Por otra parte, el distrito metropolitano tiene 5 zonas que son: norte, centro norte, centro, centro sur y sur dentro de estas zonas podemos ubicar las diferentes parroquias urbanas.

Para la determinación de los espectros de respuesta y las relaciones espectrales V/H se ha creado una malla de puntos con una separación de 500 metros en sentido Norte-Sur y Este-Oeste dentro del área previamente definida (área urbana del distrito metropolitano de Quito). Se tiene de esta manera un total de 810 puntos dentro de la malla.

Con esta consideración es posible obtener un espectro en cada punto de la malla asociado a las fallas de Puengasí, Ilumbisí, Carcelén y Catequilla, con lo que es factible calcular un total de 3240 espectros. Sin embargo el objeto de este estudio es obtener espectros de control, es decir

espectros que tengan las mayores pseudoaceleraciones asociado a una falla, a un factor de sitio y a una zona de Quito, para posteriormente determinar las relaciones espectrales V/H.

Las ecuaciones de atenuación usan diferentes parámetros asociados a las distancias respecto al sitio. En este trabajo los 810 puntos dentro de la malla previamente definida, corresponden a los sitios de estudio y las áreas de ruptura han sido consideradas en función del modelo neotectónico de [6], se asumió un escenario tectónico en que cada falla rompe de manera independiente y que el epicentro siempre estará en el centroide del plano de falla.

En las ecuaciones de atenuación descritas anteriores la determinación del efecto de sitio está asociado a la información de la velocidad media de la onda de corte de 0 a 30 metros (V_{s30}).

Si en la ciudad de Quito se tuviera un mapa de isovelocidades se tomaría estas velocidades en los diferentes sitios y se colocarían como datos de entrada en las ecuaciones de atenuación de este estudio. Sin embargo no existen este tipo de mapas en el distrito metropolitano de Quito y tampoco en el Ecuador.

Debido a que no se tiene un mapa de isovelocidades, se ha recurrido a estudios de microzonificación de suelos y a estudios de geofísica efectuados por diferentes autores para establecer los parámetros adecuados de V_{s30} para la ciudad de Quito.

Para la obtención del parámetro V_{s30} en este trabajo se toma en cuenta los siguientes informes técnicos:

- “Proyecto del manejo del Riesgo Sísmico de Quito-Ecuador (EPN.,1994)
- “Microzonificación sísmica de los suelos del distrito metropolitano de la ciudad de Quito” (Valverde *et al.*,2002)
- Estudios geofísicos a detalle realizados por el metro de Quito
- Estudios para el proyecto “Reforzamiento sísmico de las edificaciones de los centros educativos municipales del Distrito metropolitano de Quito” (Planman, 2012)
- “Microzonificación sísmica de Quito” (ERN,2012)

La (NEC-15), clasifica a los perfiles de suelos en 6 tipos diferentes que son A,B,C,D,E y F e indica los valores de V_{s30} para cada tipo de suelo, a continuación se indica la Tabla 4. Para suelos tipo C y D, debido a que para ellos se obtienen los espectros de respuesta y posteriormente las relaciones espectrales V/H. Es importante destacar que la mayor parte de los suelos de Quito son C y D.

En la Tabla 4, V_s es la velocidad de la onda de corte en los primeros 30 m.; N es el número medio de golpes del ensayo de Penetración Estándar SPT; S_u es la resistencia al corte no drenado.

4. Resultados y discusión

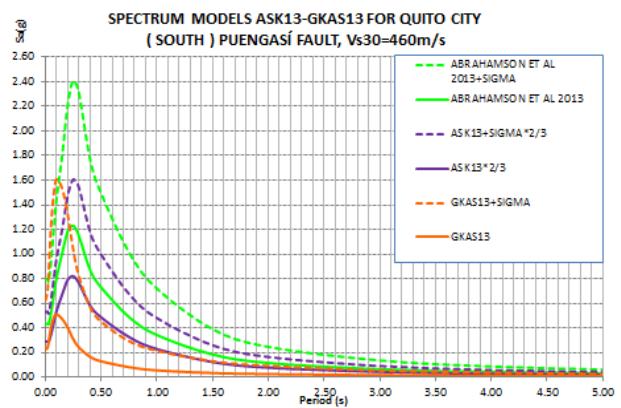
En cada una de las 5 zonas de Quito, se agruparon los suelos de acuerdo a la clasificación del NEC-15, se hallaron sus espectros en cada zona, por separado y se obtuvo un

Tabla 4.

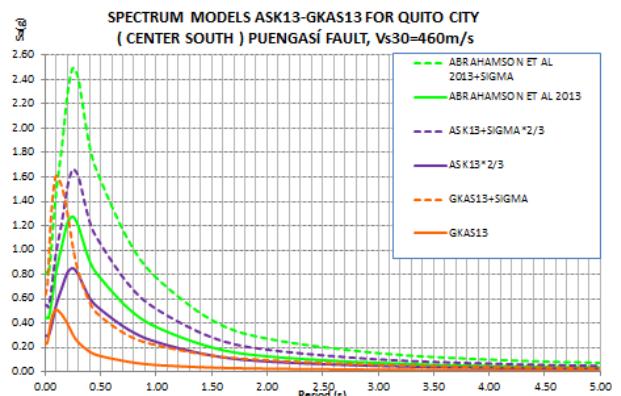
Extracto de Clasificación de los perfiles de suelo según NEC-15.

Perfil	Descripción	Definición
C	Perfiles de suelos muy densos o rocas blandas que cumplen con el criterio de velocidad de la onda de corte, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelo muy densos o roca blanda, que cumplen con cualquiera de los dos criterios.	$N \geq 50 \quad S_u \geq 1 \text{ kg/cm}^2$
D	Perfiles de suelo rígidos, que cumplen con el criterio de velocidad la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelo que cumplen con cualquiera de las dos condiciones.	$50 > N \geq 15 \quad 1 \text{ kg/cm}^2 > S_u \geq 0.5 \text{ kg/cm}^2$

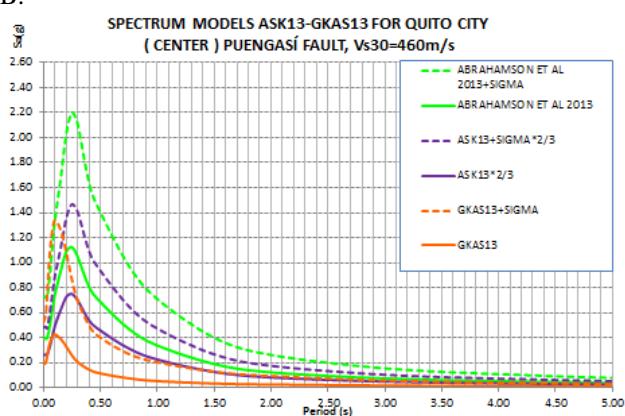
Fuente: [15]



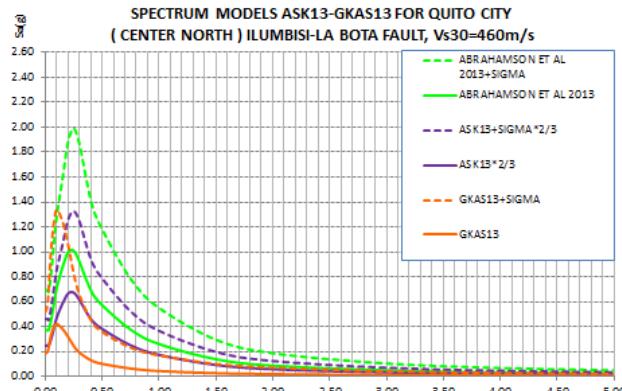
A.



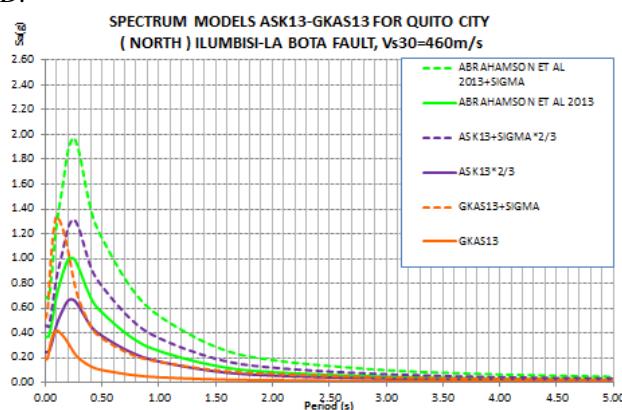
B.



C.



D.



E.

Figura 3. A. Espectros en el Sur de Quito asociados a la falla de Puengasí $V_{s30}=460\text{m/s}$. B. Espectros en el Centro-Sur de Quito asociados a la falla de Puengasí $V_{s30}=460\text{m/s}$. C. Espectros en el Centro de Quito asociados a la falla de Puengasí $V_{s30}=460\text{m/s}$. D. Espectros en el Centro-Norte de Quito asociados a la falla de Ilumbisi-La Bota $V_{s30}=460\text{m/s}$. E. Espectros en el Norte de Quito asociados a la falla de Ilumbisi-La Bota $V_{s30}=460\text{m/s}$.

Fuente: Los autores

espectro promedio, para niveles de confianza del 50 y 84%, los mismos que se indican en el presente apartado.

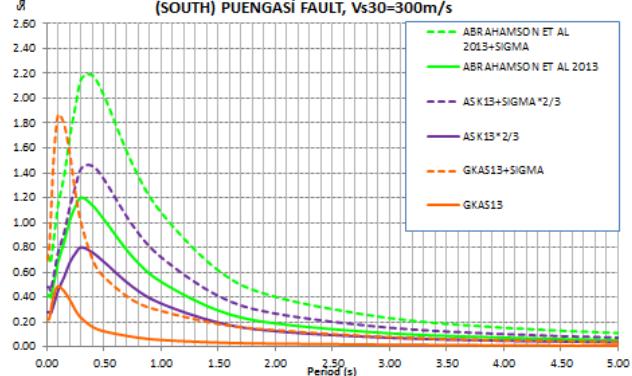
Se presentan los espectros de control de aceleración horizontal y vertical obtenidos para los modelos de movimiento fuerte expuestos, adicionalmente utilizando la relación espectral $V/H = 2/3$, la cual está basada en observación de sismos reales y que es adoptada por varias normativas internacionales incluyendo la NEC-15.

Para las zonas: Sur, Centro Sur y Centro, los mayores espectros de control se hallan a partir de un sismo de magnitud 6.4 generado en la falla de Puengasí; esto debido a la cercanía del sitio a la falla. Para el Centro Norte y Norte de Quito, en cambio los mayores espectros se tienen a partir de un sismo de magnitud 6.2, en la falla de Ilumbisi-La Bota. De tal manera que estas dos fallas son las más críticas para la ciudad.

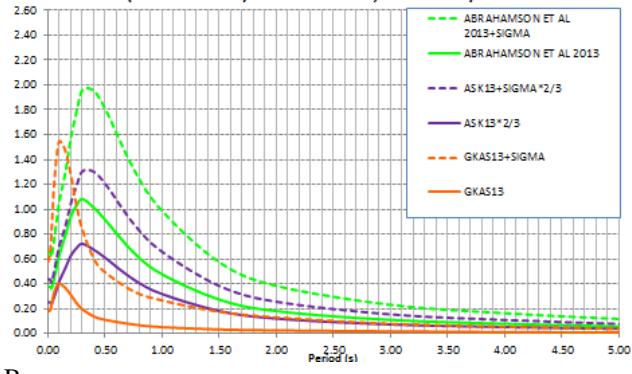
En la Fig. 3.A se indican los espectros de control que se hallan para las 5 zonas de Quito, para las fuentes sísmicas y magnitudes máximas, indicadas en el párrafo anterior en un perfil de suelo cuyo $V_s = 460\text{ m/s}$. Se indica también el espectro que se halla al multiplicar las ordenadas del espectro

SPECTRUM MODELS ASK13-GKAS13 FOR QUITO CITY

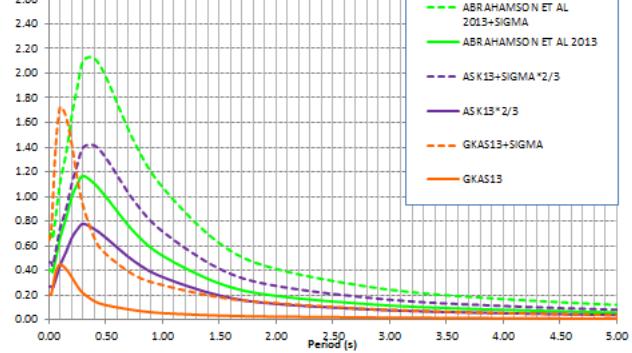
(SOUTH) PUENGASÍ FAULT, Vs30=300m/s



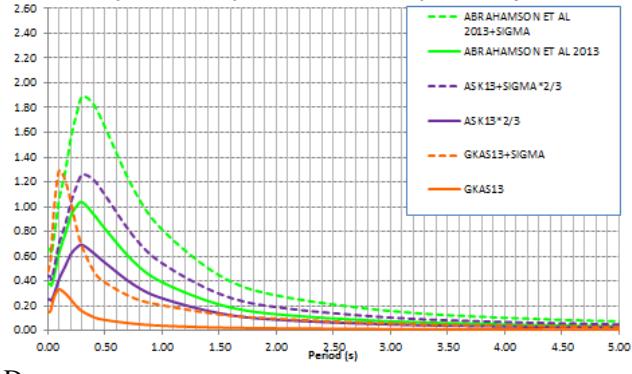
A.

SPECTRUM MODELS ASK13-GKAS13 FOR QUITO CITY
(CENTER SOUTH) PUENGASÍ FAULT, Vs30=300m/s

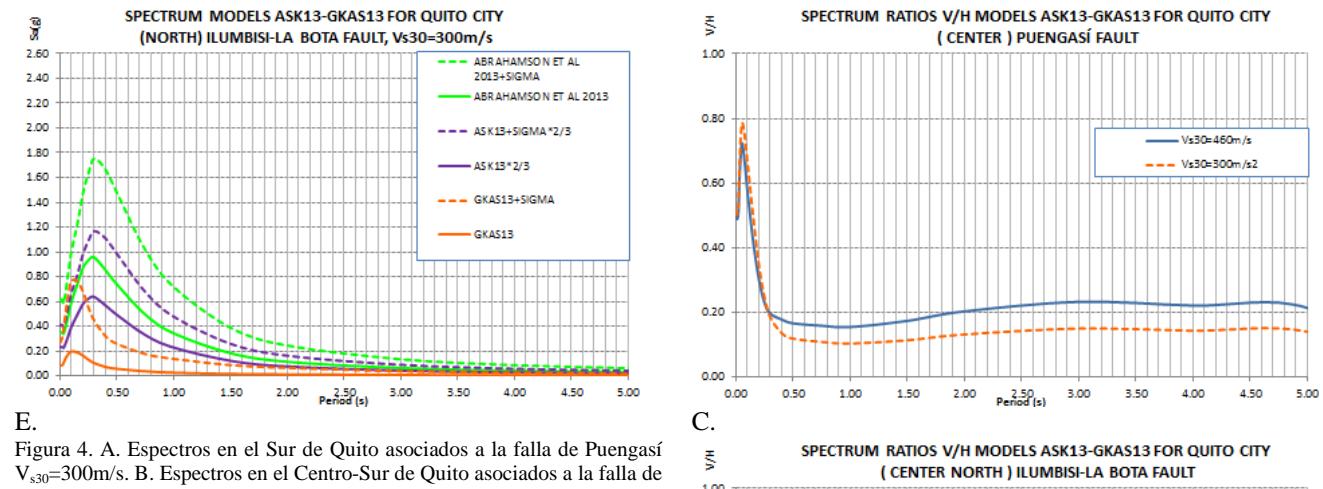
B.

SPECTRUM MODELS ASK13-GKAS13 FOR QUITO CITY
(CENTER) PUENGASÍ FAULT, Vs30=300m/s

C.

SPECTRUM MODELS ASK13-GKAS13 FOR QUITO CITY
(CENTER NORTH) ILUMBISI-LA BOTA FAULT, Vs30=300m/s

D.



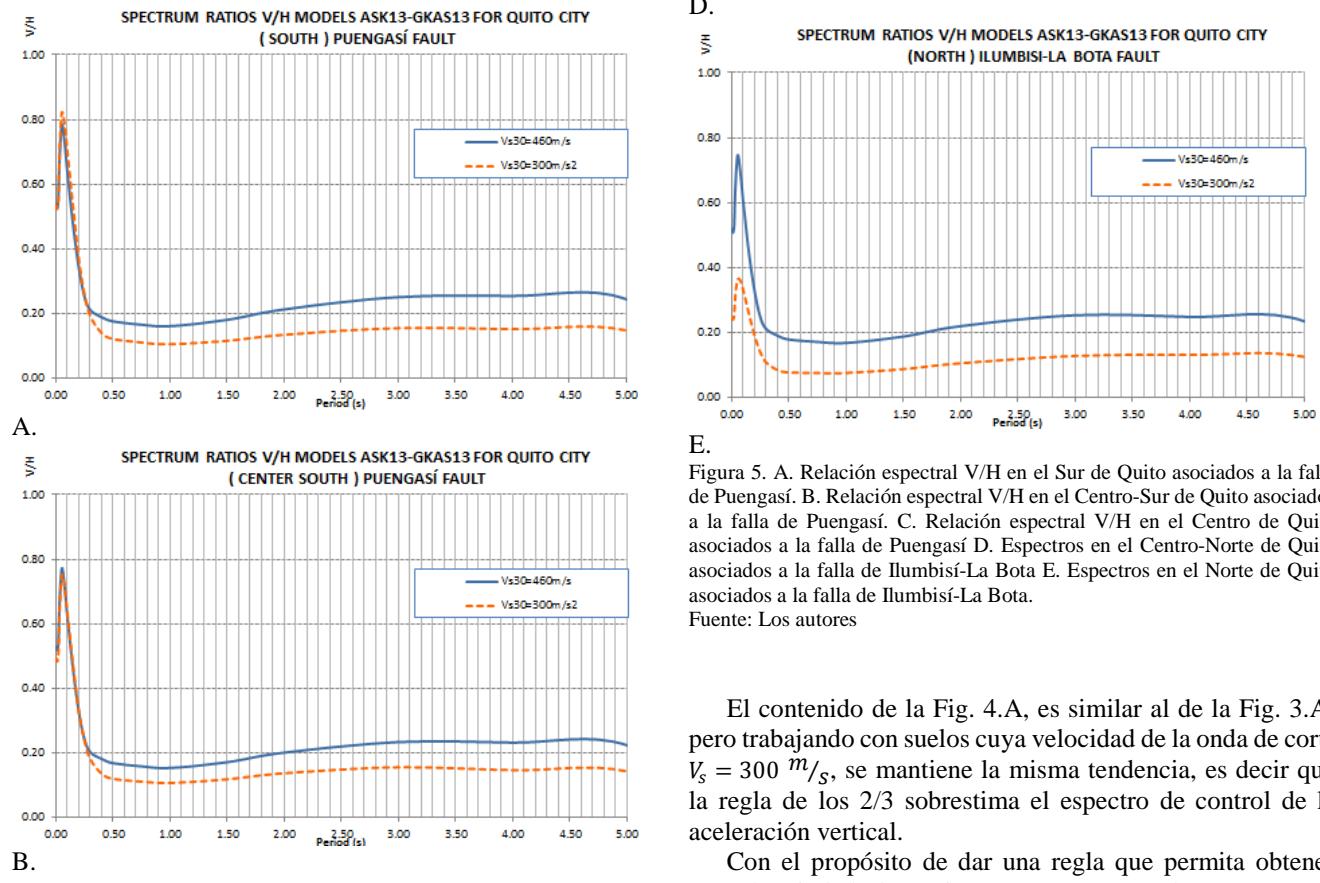
E.

Figura 4. A. Espectros en el Sur de Quito asociados a la falla de Puengasí $V_{s30}=300\text{m/s}$. B. Espectros en el Centro-Sur de Quito asociados a la falla de Puengasí $V_{s30}=300\text{m/s}$. C. Espectros en el Centro de Quito asociados a la falla de Puengasí $V_{s30}=300\text{m/s}$. D. Espectros en el Centro-Norte de Quito asociados a la falla de Ilumbisi-La Bota $V_{s30}=300\text{m/s}$. E. Espectros en el Norte de Quito asociados a la falla de Ilumbisi-La Bota $V_{s30}=300\text{m/s}$.

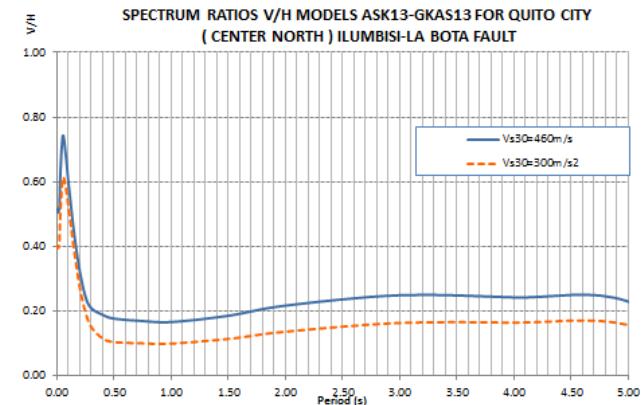
Fuente: Los autores

de aceleraciones horizontal por $2/3$ para tener en forma aproximada el espectro de aceleración vertical.

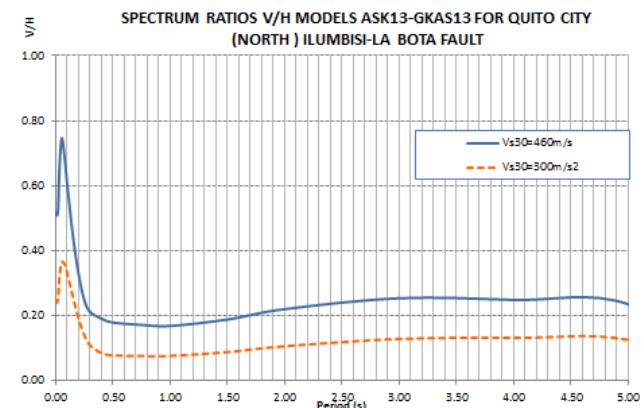
Se observa que la regla de los $2/3$ sobredimensiona notablemente, el espectro vertical que se halla con el modelo de Gulerce *et al.* 2013, para el caso estudiado.



C.



D.



E.

Figura 5. A. Relación espectral V/H en el Sur de Quito asociados a la falla de Puengasí. B. Relación espectral V/H en el Centro-Sur de Quito asociados a la falla de Puengasí. C. Relación espectral V/H en el Centro de Quito asociados a la falla de Puengasí D. Espectros en el Centro-Norte de Quito asociados a la falla de Ilumbisi-La Bota E. Espectros en el Norte de Quito asociados a la falla de Ilumbisi-La Bota.

Fuente: Los autores

El contenido de la Fig. 4.A, es similar al de la Fig. 3.A, pero trabajando con suelos cuya velocidad de la onda de corte $V_s = 300 \text{ m/s}$, se mantiene la misma tendencia, es decir que la regla de los $2/3$ sobreestima el espectro de control de la aceleración vertical.

Con el propósito de dar una regla que permita obtener para la ciudad de Quito, espectros para la componente

vertical, a partir del espectro para la componente horizontal, asociados a las fallas inversas de Quito; en la Fig. 5.A se presentan las relaciones espectrales V/H, obtenidas dividiendo la ordenada del espectro de aceleraciones verticales halladas con el modelo de Gülerce *et al.* (2013) para la ordenada del espectro de aceleraciones horizontales encontrada con el modelo de Abrahamson *et al.* (2013).

En términos generales se aprecia que para períodos mayores a 0.4 segundos, la relación V/H en suelos cuya velocidad de la onda de corte es de 300 m/s, es menor con respecto a la que se halla cuando $V_s = 460 \text{ m/s}$.

5. Conclusiones

Se determinó espectros de control para la componente horizontal y vertical de movimiento de suelo, para la ciudad de Quito, considerando la ocurrencia de un sismo de magnitud máxima en uno de los segmentos de las fallas inversas que atraviesan la ciudad. Se halló espectros en una malla en que están agrupados los puntos de acuerdo al tipo de suelo y se ha graficado los valores medios para dos niveles de confianza del 50 y 84%.

En el centro norte y norte de Quito el espectro control está asociado al segmento de falla Ilumbisí-La Bota y en el sur, centro sur y centro el segmento de falla es el de Puengasí, por la cercanía de estas fallas a las zonas indicadas.

En base a las ordenadas espectrales para la componente horizontal y vertical del movimiento del suelo se determinó la relación denominada V/H dividiendo la aceleración espectral de la componente vertical para la componente horizontal. Esta relación sirve para obtener espectros verticales a partir de un espectro para la componente horizontal.

Del estudio realizado se desprende que la forma del espectro de aceleración horizontal y vertical son similares, el espectro de aceleración horizontal multiplicado por 2/3 presenta mayores ordenadas espectrales que el determinado con el modelo para aceleración vertical, sin considerar la desviación estándar; cuando se considera se observa que en el rango de períodos muy bajos los espectros hallados a partir de la componente vertical son mayores a los que se hallan con la regla de los 2/3 esto se puede notar en las Figs. 3, 4.

En la Fig. 5, notamos el efecto de la magnitud y de la condición de sitio en las curvas de las relaciones V/H. Respecto a la magnitud se puede mencionar que es consistente encontrar la mayor relación V/H en la falla de Puengasí asociada al sector sur debido a que esta falla presenta la mayor magnitud esperada $M_w=6.4$. Respecto a la condición de sitio notamos que las relaciones V/H para $V_{s30}=460 \text{ m/s}$ y $V_{s30}=300 \text{ m/s}$ son similares en los períodos cortos a excepción de la falla Ilumbisí la Bota asociada al norte de Quito en el que existe marcada diferencia. En los períodos largos existe la tendencia que relación V/H para $V_{s30}=460 \text{ m/s}$ es mayor a la obtenida para $V_{s30}=300 \text{ m/s}$.

La relación estipulada en el NEC-15, $V/H=2/3$ es consistente en un rango de períodos bastante corto $0 < T < 0.2 \text{ s}$ y en el restante rango de períodos se nota bastante conservadora.

Con el trabajo realizado se genera un aporte para la determinación del peligro sísmico en la ciudad de Quito y se motiva al Calculista Estructural a considerar la acción sísmica vertical ya que en determinadas estructuras (con voladizos grandes) influye de manera importante en su comportamiento.

La mayor incertidumbre que se tiene es en la determinación de la magnitud máxima esperada en cada segmento de falla; esta responde a una longitud o un área de ruptura por lo que se tiene que ser cauteloso en la determinación de los espectros de diseño y máximo sismo considerado. Con esto lo que se pretende es que el Proyectista Estructural diseñe su estructura para varios espectros los que le reporta el NEC-15 y los que se han presentado en este artículo.

En este trabajo se han presentado relaciones espectrales V/H de control asociadas a cada sector de Quito, finalmente en una investigación futura, se recomienda presentar las relaciones V/H asociadas a la distancia epicentral ya que es sabido que en el campo cercano al punto de ruptura de la falla las relaciones V/H serán mayores.

Referencias

- [1] Abrahamson, N., Silva, W. and Kamai, R., Update of the AS08 Ground-motion prediction equations based on the NGA-West2 Data Set. Pacific Earthquake Engineering Research Center Headquarters, University of California, Berkeley, 2013.
- [2] Abrahamson N. and Silva W., Summary of the Abrahamson and Silva NGA ground-motion relations, Earthquake Spectra 24, pp. 67-97, 2008.
- [3] Aguiar, R., Espectros de control para la ciudad de Quito-Ecuador, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, Universidad Politécnica de Cataluña, IS-72, Barcelona, 2015, 124 P.
- [4] Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J.M., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., Lamarque, G., Yepes, H., Mother, P., Rolandone, F., Jarrin, P. and Quidelleur, X., Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity, Tectonics, 33, pp. 67-83, 2014. DOI: 10.1002/2012tc003224.
- [5] Alvarado, A., La deformación continental en el Ecuador y su implicación en el peligro sísmico, Tercer Encuentro de Ingeniería Civil. Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2013.
- [6] Alvarado, A., Néotectonique et cinématique de la déformationcontinentale en Equateur. These pour obtenir le grade de Docteur. Université de Grenoble, France, 2012.
- [7] Ancheta, T., Darragh, R., Stewart, J., Seyhan, E., Silva, W., Chiou, B., Woodell, K., Graves, R., Kottke, A., Boore, D., Kishida, T. and Donahue, J., PEER NGA-WEST-2 Database. Report PEER 2013/03. PEER-Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA, 2013.
- [8] CEC-2000. Código Ecuatoriano de la Construcción, Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha, Quito, 2000
- [9] Douglas, J., Ground-motion prediction equations 1964–2016. [online]. Available at: www.gmpe.org.uk/
- [10] ERN-Evaluación de Riesgos Naturales: Microzonificación sísmica del distrito metropolitano de Quito. Estudio de la amenaza sísmica a nivel local. Programa de reducción de riesgos urbanos del Distrito Metropolitano de Quito, 2012.
- [11] Frau, C.D. y Saragoni, R., Terremotos tipo pulso y efectos de directividad de la ruptura, CeReDeTeC-Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Tesis, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina, 2012, 26 P.

- [12] Gülerce, Z., Kamai, R., Abrahamson, N.A. and Silva, W.J., NGA-West2 ground motion prediction equations for vertical ground motions. Report PEER 2013/24, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, pp. 3-48, 2013.
- [13] Kamai, R., Abrahamson, N. and Silva, W., Nonlinear horizontal site response for the NGA-West2 project. Report PEER 2013/12, PEER-Pacific Earthquake Engineering Research Center Headquarters, University of California, Berkeley, USA, 2013.
- [14] Leonard, M., Earthquake fault scaling: Self consistent relating of rupture length width, average displacement, and moment release, Bulletin of the Seismological Society of America, 100 (SA), pp. 1971-1988, 2010.
- [15] NEC-15. Norma Ecuatoriana de la Construcción, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI, 2015.
- [16] PLANMAN. Estudio de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de los centros educativos municipales en el Distrito Metropolitano de Quito. Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad. Distrito Metropolitano de Quito, Fase A, 153 P., y Fase B, 120 P., Quito, 2012.
- [17] Quizanga, D., Espectros específicos para la ciudad de Quito en función de fallas ciegas inversas, Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2015, 165 P.
- [18] Rivas-Medina, A., Aguilar, R., Benito, M.B., Gaspar, J. y Parra, H., Determinación del período de recurrencia y magnitud máxima para el control de las estructuras en el rango elástico ante un sismo asociado a las fallas inversas de Quito, Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, 19, pp. 201-217, 2014b.
- [19] Valverde, J., Fernández, J., Jiménez, E., Vaca, T. and Alarcón, F., Microzonificación sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de la Ciudad de Quito, Tesis, Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, Quito, Ecuador, 2002.

R. Aguiar-Falconí, graduado de Dr. en Ingeniería Sísmica en la Universidad Politécnica de Cataluña. De MSc. en Ciencias en la Universidad Central de Venezuela y de Ingeniero Estructural en la Escuela Politécnica Nacional. Ex Director de la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología de Ecuador. Ex Director y Fundador del Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Autor de 20 libros que están en Researchgate y de más de 80 artículos publicados a nivel internacional. Ganador de un Certificado de Distinción del Premio Sasakawa otorgado por Naciones Unidas en Ginebra. Nacido en Riobamba, Ecuador.
ORCID: 0000-0002-2771-1721

E. López-Moreno, MSc. en Estructuras en la Escuela Politécnica Nacional en 2016, Ing. Civil en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en 2010. Coautor de artículos de ingeniería estructural. Participe de proyectos de ingeniería para el sector industrial a nivel nacional e internacional. Actual ingeniero líder civil en proyectos integrales del Ecuador PIL S.A.
ORCID: 0000-0002-5525-269X

D. Quizanga-Matíne, MSc. en Estructuras en la Escuela Politécnica Nacional, Ing. Civil en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Actual profesor titular de la carrera de ingeniería civil en la Universidad Central del Ecuador, investigador de riesgo sísmico y comportamiento dinámico de estructuras. Consultor particular de proyectos de Ingeniería y Construcción.
ORCID: 0000-0002-9063-6752

Focal mechanism construction in the north of the Colombian Central Cordillera from record the National Seismological Network of Colombia

Gustavo Posada ^{a,b}, Gaspar Monsalve^b & Ana María Abad ^{b,c}

^aSistema de Alerta Temprana de Medellín y Valle de Aburrá (SIATA), Medellín, Colombia. gaposadar@unal.edu.co

^bDepartamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. gmonsalvem@unal.edu.co amabadv@unal.edu.co

^c Integral S.A.

Received: April 26th, 2016. Received in revised form: January 30th, 2017. Accepted: March 25th, 2017

Abstract

The collection of waveforms of earthquakes between 2009 and 2015, of local magnitude greater than 4, at stations of the Seismological National Network of Colombia (in Spanish *Red Sismológica Nacional de Colombia* [RSNC]), occurred on the quadrangle 76°W-74°W and 4°N-8°N (Northern Central Cordillera, centered on the Antioquia Plateau), makes possible the construction of focal mechanisms using first motion polarities of P-wave arrivals on seismograms. The processing was conducted on the Schmidt net, yielding a total of 14 focal mechanisms that were associated with regional faults, with results that suggest two (2) main trends of stress regime: A region between 8°N and 7°N is under a NW-SE compressional stress, while in the south of the study area, between 4°N y 6°N, we mostly observe focal mechanisms that correspond to a strike slip regime.

Keywords: Focal Mechanism; Polarity; P-Wave, Take-off Angle; RSNC.

Construcción de mecanismos focales en el norte de la Cordillera Central colombiana a partir de registros de la Red Sismológica Nacional de Colombia

Resumen

La recopilación de formas de onda de sismos entre los años 2009 y 2015, de magnitud local mayor a 4, en las estaciones de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), sobre el cuadrángulo 76°W-74°W y 4°N-8°N (Norte de la Cordillera Central, centrado en el Altiplano Antioqueño), permite realizar la construcción de mecanismos focales evaluando la polaridad de la Onda P al momento en que esta es registrada en los sismogramas. Mediante procesamiento sobre la red Schmidt se obtuvieron 14 mecanismos focales que fueron asignados a fallas regionales, con resultados que muestran dos (2) tendencias principales del régimen de esfuerzo que generó los eventos. Una primera zona entre los 8°N y 7°N bajo un esfuerzo compresional NW-SE, mientras que en la zona sur del área estudiada, entre los 4°N y 6°N, se observan en su mayoría mecanismos focales que corresponden a un régimen transformante.

Palabras clave: Mecanismo Focal; Polaridad, Onda P; Ángulo de salida; RSCN.

1. Introducción

La complejidad tectónica existente en los Andes colombianos está determinada por la interacción de las placas Nazca, Caribe y Sudamericana; adicional a éstas se presentan

el Bloque Panamá-Chocó [1-3] y el Bloque Norandino [2-4], que comprende la zona Andina colombiana y gran parte de las regiones costeras en el Caribe y el Pacífico (Fig. 1). La sismicidad reportada por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) en el Bloque Norandino evidencia la

How to cite: Posada, G., Monsalve, G. and Abad, A.M., Construcción de mecanismos focales en el norte de la Cordillera Central colombiana a partir de registros de la Red Sismológica Nacional de Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, 42, pp. 36-44, Julio, 2017.

deformación existente producto del estado de esfuerzos que hoy en día predomina en el territorio de los Andes colombianos y en zonas vecinas [4,5].

Durante un sismo la energía elástica acumulada es liberada mediante desplazamiento físico de las masas de roca, en forma de calor y por ondas sísmicas que viajan desde el foco hacia afuera. El estudio de los mecanismos focales es de gran ayuda para entender el comportamiento tectónico global debido a que su interpretación permite deducir los tipos de esfuerzos que generan la ruptura en un sistema de fallas activo.

En este estudio se presenta una recopilación de la sismicidad para la parte norte de la Cordillera Central colombiana y zonas vecinas, entre los años 2009 y 2015, durante los cuales ha habido una densificación en el cubrimiento de la RSNC. Para sismos con magnitud mayor a 4.0 en la escala de Richter, se construyó el mecanismo focal que generó el evento, con base en las polaridades de los primeros movimientos asociados al sismo, registrados en las estaciones de la RSNC.

La región de estudio se localiza en la parte norte de los Andes colombianos, en el rectángulo de coordenadas 4°N-8°N y 76°W-74°W, cubriendo así la parte norte de la Cordillera Central y, localmente, algunas zonas en el flanco Este de la Cordillera Occidental y el flanco Oeste de la Cordillera Oriental (Fig. 2). Dicha región se centra de manera aproximada en el llamado Altiplano Antioqueño [6], una región con poca sismicidad reciente, que incluye la ciudad de Medellín y su área metropolitana, donde la amenaza sísmica obedece fundamentalmente a fuentes que están por fuera de ella [7] y, en particular, en las zonas limítrofes del Altiplano. Este estudio busca caracterizar las fuentes sísmicas recientes de mayor impacto potencial en dicho centro urbano.

A través del análisis de mecanismos focales se pueden conocer las zonas donde predominan los esfuerzos compresivos y distensivos, así como deducir la actitud de la falla que origina los sismos. Estudios anteriores han clasificado el área de interés con régimen compresivo, con un sigma 1 de 097°/9° y sigma 3 de 238°/79° [4]. Corredor (2003) separa la zona de estudio en dos bloques, al norte lo define como bloque central de Colombia con régimen compresional y, al sur, define el bloque sur de Colombia con un régimen de fallamiento de rumbo.

2. Marco geotectónico

Los Andes colombianos se distribuyen en tres cordilleras: Occidental, Central y Oriental. A menor escala existen otros sistemas montañosos como la Serranía de San Lucas, Serranía de La Macarena y La Sierra Nevada de Santa Marta (Fig. 1).

El Altiplano Antioqueño, en el norte de la Cordillera Central, se caracteriza por tener una elevación media de 2.500 msnm con subdivisiones topográficas internas representadas por colinas inferiores a los 40 metros y relieve con pendientes inferiores a 40° [6].

2.1. Geología de la zona de estudio

La Cordillera Central se compone de un basamento Paleozoico conformado principalmente por rocas metamórficas del Complejo Cajamarca [8]. Los cuerpos magmáticos que se presentan a lo largo de la Cordillera Central representan varios eventos de subducción a lo largo del Mesozoico hasta el presente, los cuales están representados principalmente por los Batolitos de Ibagué, de Sonsón y Antioqueño.

El límite existente en el sistema de fallas de Romeral (Fig. 1) separa las unidades metamórficas de la Cordillera Central al Este, de las rocas oceánicas de la Cordillera Occidental al Oeste [6-8], de las cuales se presume que se acrecieron a la margen continental a partir del Cretáceo tardío [8-10]. La cordillera Oriental corresponde a material de basamento continental cubierto por rocas sedimentarias producto de un ambiente de *Rift* en el Jurásico-Cretáceo, que permitió la deposición de sedimentos que formaron, en su mayoría, las rocas que afloran en la Cordillera [11,12]; en tal cordillera existen también rocas Cenozoicas relacionadas con la inversión tectónica sufrida en este periodo de tiempo [13,14] y unidades asociadas al levantamiento de la Cordillera Central [15].

El límite geológico entre la Cordillera Central y la Cordillera Oriental es definido por el sistema de fallas Otú-Pericos; separando así el terreno Tahamí, que corresponde al

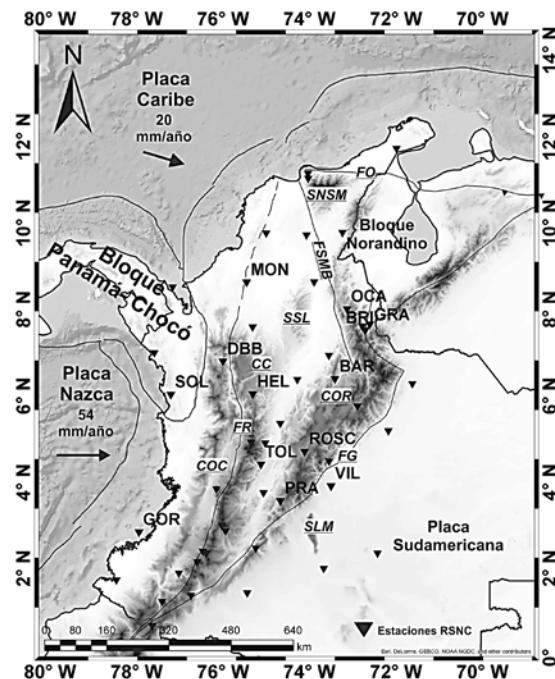


Figura 1. Marco tectónico regional de los Andes Colombianos. Los triángulos representan las estaciones de la Red Sismológica Nacional de Colombia, algunos de ellos acompañados por el código de la estación. FG: Falla Guaicaramo; FR: Falla Romeral; FSMB: Falla Santa Marta - Bucaramanga; FO: Falla Oca; COC: Cordillera Occidental; CC: Cordillera Central; COR: Cordillera Oriental; SSL: Serranía de San Lucas; SLM: Sierra de La Macarena; SNSM: Sierra Nevada de Santa Marta. Fallas compiladas de [2,4]. Vectores de velocidades tomados de [3,4].

Fuente: Elaboración propia.

núcleo polimetamórfico de la Cordillera Central del terreno Chibcha, que comprende a la Cordillera Oriental, Serranía de San Lucas y parte del flanco oriental de la Cordillera Central en el departamento del Tolima [8].

2.2. Configuración tectónica

Las Placas Caribe y Nazca subducen debajo del Bloque Norandino. Nazca subduce hacia el este con una tasa de movimiento de 54 mm/año relativa a la parte estable de Sudamérica, mientras Caribe, que se desplaza hacia el Sureste, se mueve a una velocidad de 20 mm/año relativa al mismo marco de referencia (Fig. 1) [3]. La zona de estudio parece estar bajo el régimen de esfuerzo producido por la Placa Nazca principalmente, la cual se encuentra subduciendo en el Suroccidente de Colombia con un *plunge* aproximado de 35° [16]. Recientemente se ha planteado la posibilidad de subducción plana de la placa Nazca por debajo del Altiplano Antioqueño [17]. Debido a la colisión del Bloque Panamá – Chocó en el Mioceno medio (13 – 15 Ma) [1-3,18] se registró una deformación que se manifiesta en la Cordillera Occidental, donde se presentan estructuras que evidencian deformación frágil, además de sismicidad activa [2,4,5].

La zona de estudio es atravesada por los sistemas de fallas Cauca - Romeral, Otú – Pericos y de Palestina. El sistema de fallas Cauca – Romeral posee un comportamiento de rumbo, donde se destaca la falla San Jerónimo, que separa el Complejo Cajamarca, el cual constituye el basamento metamórfico de la Cordillera Central, del Complejo Quebradagrande (unidad de rocas volcano-sedimentarias oceánicas) [8,10,20]. El sistema de fallas Otú-Pericos y la Falla Palestina tienen un comportamiento de rumbo, y se intersectan alrededor de la latitud 6.5 °N; la Falla Otú-Pericos se ha caracterizado como sinistral [19] y la Falla Palestina como dextral [21]. Restrepo y Toussaint (1988) asocian estos dos sistemas de falla a una zona de sutura que separa los terrenos Tahamí y Chibcha, ambos de naturaleza continental.

3. Sismicidad

La sismicidad actual que se registra en los Andes Colombianos es producto de los regímenes de esfuerzos producidos por la dinámica de la configuración tectónica de Colombia.

La variación en la profundidad de los sismos es indicativa de su origen, ya que éstos pueden ser producto de subducción o generarse a partir de la deformación a lo largo de las principales fallas que tienen expresión en superficie. La sismicidad superficial a intermedia sugiere que las losas (*slabs*) de las placas Nazca y Caribe subducen bajo el Bloque Norandino [16]. La sismicidad reportada por la RSNC entre los años 2009 y 2015 para Colombia muestra una distribución espacial que se puede observar en la Fig. 3.

Dos acumulaciones significativas de sismos de profundidad intermedia se encuentran en los nudos sísmicos de Bucaramanga [16,22] y Cauca [23] (Fig. 3). La distribución de sismos con magnitud local más elevada a lo

largo del territorio colombiano predomina en las márgenes de convergencia, en las principales fallas del territorio colombiano (Romeral, Ibagué, Santa Marta - Bucaramanga, Guaicaramo, Murindó, etc.) y en los nidos sísmicos (Fig. 3) [2].

4. Metodología

La recopilación de sismos de la consulta experta de la RSNC presenta para la zona de estudio un total de 18 sismos con magnitud local mínima de 4 y máxima de 4,7 (Fig. 4). La Tabla 1 muestra los sismos recopilados para el cuadrángulo 74°W – 76°W y 4°N – 8°N.

El mecanismo focal de un sismo se representa con dos planos nodales que dividen la esfera en cuatro sectores de área, dos correspondientes a esfuerzos de compresión y dos de dilatación [24]. Las zonas de compresión están atravesadas por el eje de tensión, de modo que las ondas P que son registradas en las estaciones ubicadas en estas direcciones registran un movimiento ascendente, mientras que las zonas de dilatación contienen el eje de presión, y las ondas P que se propagan en estas direcciones registran un movimiento descendente (Fig. 5).

Para la construcción del mecanismo focal de cada sismo se analiza la polaridad de la llegada de la onda P usando los registros de formas de onda obtenidos de la RSNC. Hallando el azimut evento-estación y el ángulo de salida (*take-off angle*), se procede a calcular el mecanismo focal en la red de Smith [25].

4.1. Parámetros del mecanismo focal

El formato de onda adquirido es graficado en el software SEISAN [26-27], con el fin de identificar la polaridad de la onda P generada por cada uno de los eventos al momento de llegar a cada una de las estaciones, buscando clasificar el primer movimiento como ascendente o descendente (Fig. 6).

Al identificar la polaridad de la llegada en cada una de las estaciones, se procede a calcular el azimut de la estación

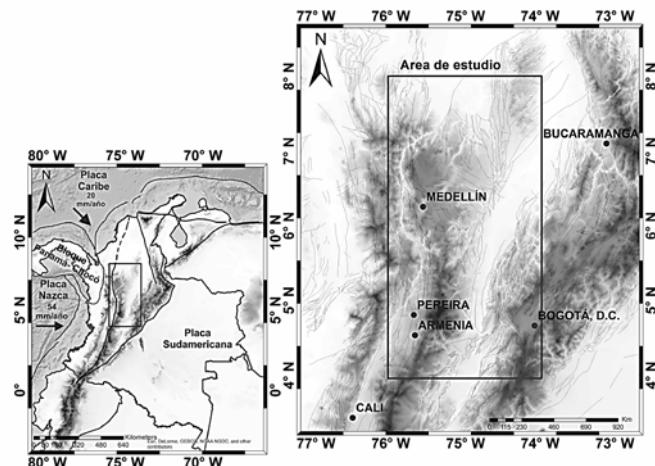


Figura 2. Localización de la zona de estudio.
Fuente: Modificado de [2-4]

Tabla 1.

Sismos recopilados de la RSNC para la zona de estudio entre los años 2009 y 2015. Magnitud local (MI) mayor a 4.0. Lat.: latitud, Lon.: longitud. Cod.: Código.

Fecha	Lat.	Lon.	Profundidad (km)	Magnitud (MI)	Cod.
31/03/2009	7,81	-74,951	2	4,3	1
01/05/2009	7,156	-75,312	16,7	4,4	2
31/07/2009	7,009	-75,822	0	4,1	3
24/11/2009	5,007	-74,745	15,5	4,1	4
11/01/2010	4,301	-75,76	180	4,7	5
04/03/2010	4,938	-75,446	130	4,7	6
26/07/2010	4,524	-75,422	0	4,1	7
01/06/2011	4,875	-75,955	19,8	4,5	8
03/06/2011	7,635	-74,002	16	4	9
08/02/2012	5,373	-74,872	0,2	4,1	10
20/06/2012	6,575	-74,122	28,8	4,4	11
31/07/2012	4,553	-75,985	16,6	4,2	12
09/03/2013	7,334	-74,859	46,1	4,3	13
18/04/2013	4,95	-75,34	4	4	14
21/04/2013	4,945	-75,34	7,5	4	15
25/08/2013	7,758	-75,013	4,3	4,7	16
19/10/2014	4,966	-75,976	114,3	4,2	17
18/09/2015	4,105	-75,872	0	4,2	18

Fuente: Elaboración propia.

relativo al foco del evento. El parámetro siguiente que se debe obtener para la construcción del mecanismo focal es el ángulo de salida, el cual se mide con respecto a la vertical y es aquel con el que el rayo parte desde el epicentro hasta la estación de registro en superficie. Éste ángulo es calculado a través del software TauP [28] usando el modelo de velocidad IASP91 [29].

4.2. Construcción del mecanismo focal

Una exposición detallada para la construcción de mecanismos focales a partir de la polaridad de la onda P puede encontrarse en Cronin (2010). La Tabla 2 ilustra un ejemplo donde se muestran los parámetros necesarios para graficar el mecanismo focal.

La elaboración manual se realiza en la red de Schmidt usando los valores de azimut y ángulo de salida hallados para cada estación; estos valores se llevan a la red tal y como se lleva un dato estructural en convención *dip/dip direction* [30].

En la Fig. 7 se ilustra la disposición de la polaridad del evento correspondiente al 01/06/2011 (Código 8 en Tabla 1) para unas estaciones definidas. Cuando se han identificado los puntos en la red se procede a aproximar los planos nodales. La solución no es única, pero el resultado sirve como un buen estimativo del mecanismo de generación del sismo. Luego de graficar los planos nodales, se finaliza el proceso al asignarle los colores negro a los cuadrantes que contienen el eje de tensión, y blanco indicando los cuadrantes en los que está el eje de presión.

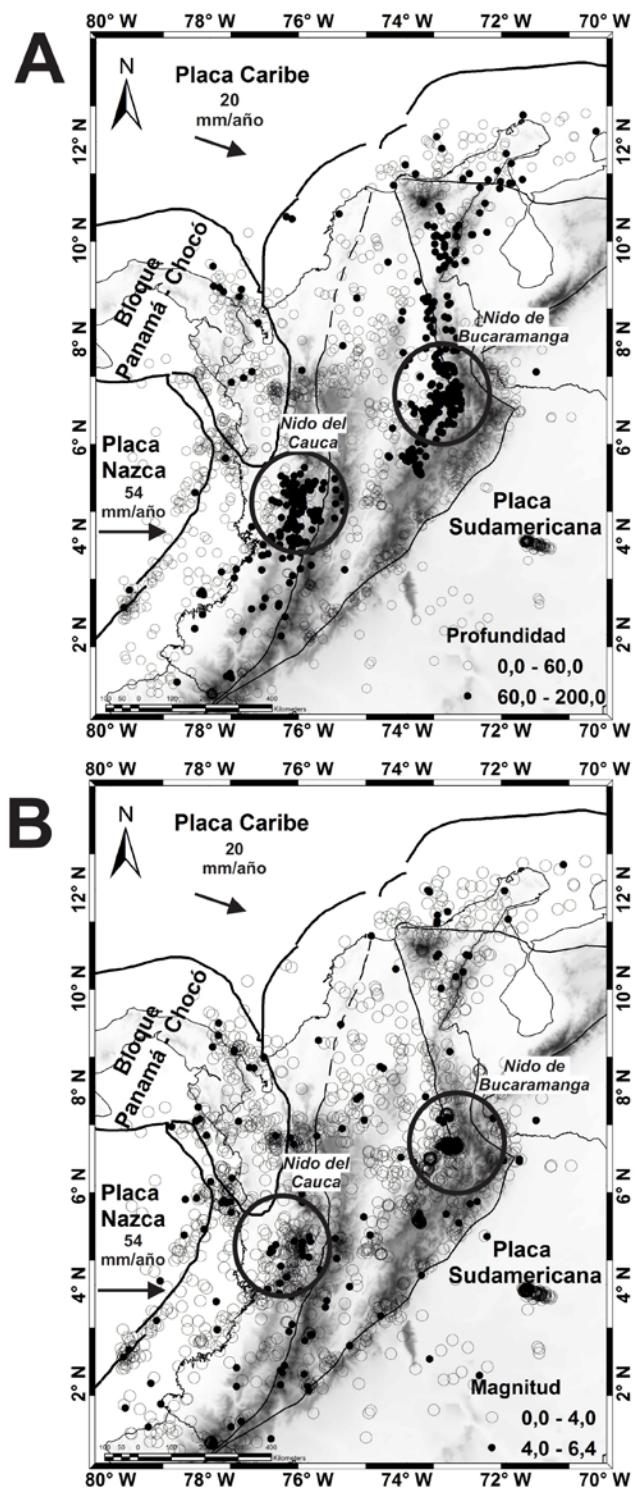


Figura 3. Distribución de la sismicidad en Colombia entre 2009 y 2014 (MI>3.0). A: Mapa sísmico discriminado por profundidad, sismos con profundidades menores a 60 km (círculos vacíos) y mayores a 60 km (círculos rellenos). B: Mapa sísmico discriminado por magnitud; Sismos menores a 4.0 MI (círculos vacíos) y sismos mayores a 4.0 MI (círculos rellenos). Las regiones encerradas corresponden a los nidos sísmicos. Datos de la RSNC.

Fuente: Modificado de [3-4].

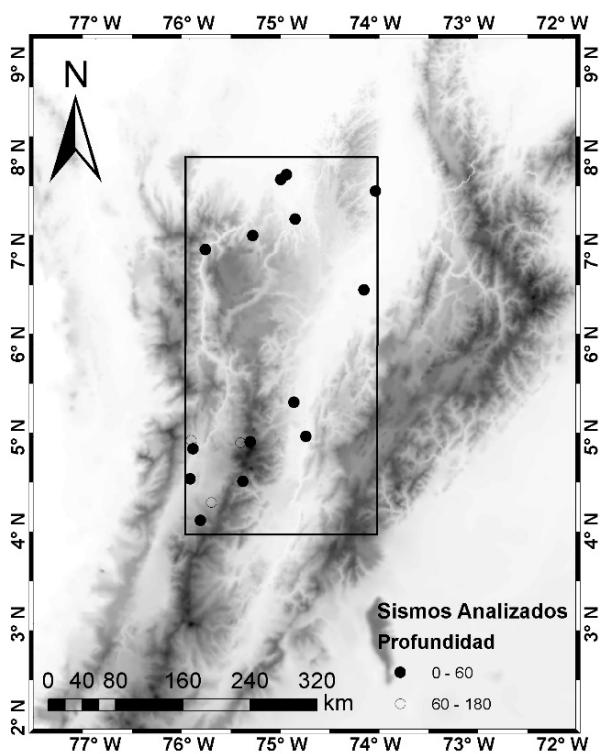


Figura 4. Epicentros de los sismos analizados, recopilados de la RSNC.
Fuente: Elaboración propia.

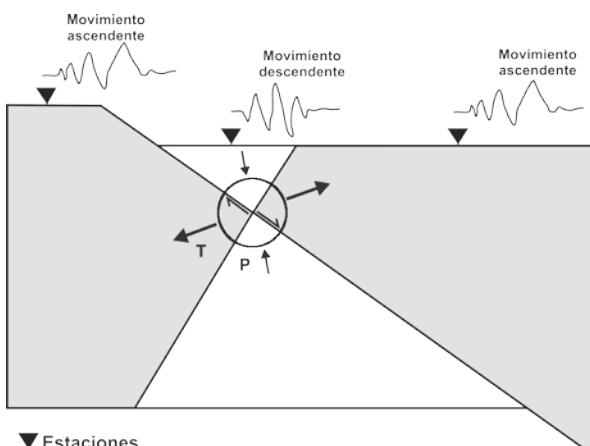


Figura 5. Registro de onda y patrón de radiación según la dirección de propagación de la onda: en dirección T movimiento ascendente (Compresión), y en dirección P movimiento descendente (Dilatación). T: eje de tensión; P: eje de Presión.
Fuente: Modificado de USGS (escweb.wr.usgs.gov/share/mooney)

5. Resultados y discusión

De los 18 sismos identificados para la zona de estudios se logró obtener el mecanismo focal de un total de 14 eventos. La Fig. 8 muestra la distribución en planta de los mecanismos focales hallados; se descarta el mecanismo focal 5 debido a que no pertenece a la corteza y no corresponde a fallas con traza superficial definida, por lo cual no se incluye en los análisis.

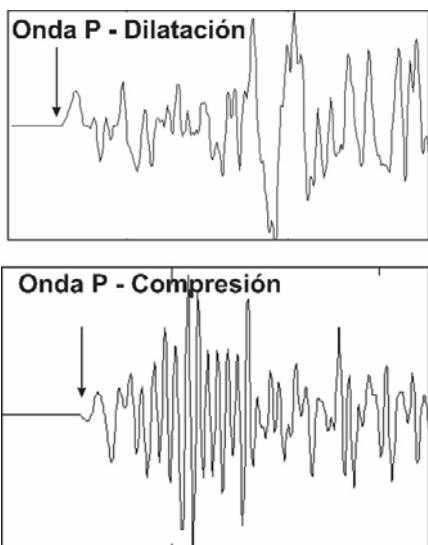


Figura 6. Formato de onda evaluado en SEISAN correspondiente al evento 01/06/2011 (Código 8 en Tabla 1). La imagen superior corresponde a la estación MON y la inferior para la estación ROSC (ver Fig. 1 para su localización).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.

Parámetros encontrados para el sismo del 21 de abril de 2013 (código 15 en Tabla 1).

21/04/2013			
Estación	Azimut (grados)	Ángulo de salida (grados)	Polaridad
BAR	60	45	Descendente
BRI	50	45	Descendente
DBB	358	44	Ascendente
GOR	234	45	Descendente
GRA	50	45	Descendente
HEL	30	64	Descendente
MARA	179	45	Ascendente
MON	7	46	Descendente
OCA	41	45	Descendente
OTAV	208	45	Ascendente
PRA	136	45	Ascendente
ROSC	95	44	Ascendente
SOL	312	44	Ascendente
TOL	120	45	Ascendente
VIL	112	45	Ascendente

Fuente: Elaboración propia.

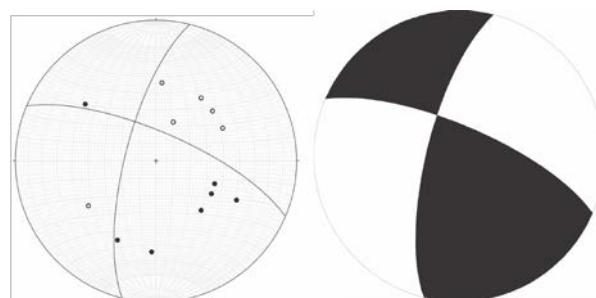


Figura 7. Mecanismo focal hallado para el evento del 01/06/2011 (código 8 en Tabla 1). Los círculos vacíos corresponden a polaridades dilatacionales; los círculos llenos a polaridades compresionales.

Fuente: Elaboración propia.

Para facilidad en el análisis, se dividió el área de estudio en dos zonas, denotadas por A y B. En la zona A del área de estudio (Fig. 8) se registran 5 eventos. La agrupación de estos mecanismos focales evidencia la posibilidad de un esfuerzo compresional de dirección NW-SE que podría estar asociado a una acomodación del Bloque Panamá – Chocó [31]. Los mecanismos focales que se observan en la zona B de la Fig. 8a ilustran un estado de esfuerzos correspondientes principalmente a fallas de componente en el rumbo.

En un sistema en el que dominan movimientos de rumbo, el sistema de esfuerzos permite la combinación de diferentes tipos de fallamiento bajo el mismo régimen y su orientación depende de la actitud de la falla de rumbo principal [32]. Es así como pueden encontrarse fallas inversas con rumbo perpendicular al esfuerzo principal máximo (sigma 1), fallas normales con rumbo perpendicular al esfuerzo principal mínimo (sigma 3) y sistemas de fracturamiento o fallamiento tipo Riedel y Antiriedel (R y R'), simétricos con respecto al esfuerzo principal máximo y con rumbos que hacen ángulo de 20°-30° y 50°-60°, respectivamente, con la falla de rumbo principal [32-34]. La Fig. 8b muestra una configuración aproximada de un elipsode originado por un esfuerzo compresivo: los mecanismos focales asociados a fallas inversas (códigos 1 y 3) presentan planos nodales con tendencia perpendicular al esfuerzo de compresión sigma 1, mientras que los que se asocian a las fallas de rumbo (códigos 2 y 11) se acomodan a las estructuras R y R' producidas por el esfuerzo principal; el mecanismo normal (código 9) registrado presenta un plano nodal aproximadamente paralelo a la dirección de compresión.

En la Fig. 8c, correspondiente a la zona B, se observa un total de 8 mecanismos focales asociados a eventos en la corteza (códigos 10, 4, 14, 15, 8, 12, 7, 18). En cinco de estos eventos se presentan componentes de rumbo (8, 10, 15, 7, 14, 18). Se encuentran también dos mecanismos focales asociados a fallas normales con componente en el rumbo (códigos 4, 12). La disposición de los mecanismos focales ubicados en esta zona indica un régimen de fallamiento de rumbo con un posible movimiento sinistral. Así, entre 5° 30' N y 4°N, se observa una componente sinistral, lo cual es parcialmente consistente con lo encontrado por Ego (1996), quien expone la existencia de una componente sinistral en el sistema de fallas de Romeral, a partir de 5°N hacia el norte [17].

Cortés y Angelier (2005), con mecanismos focales recopilados de la base de datos de *Harvard CMT* (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>), deducen que para las zonas A y B (Fig. 8) existe un régimen de compresión con una dirección NW-SE. Para la zona B, lo mostrado por los mecanismos focales en este estudio difiere de lo expuesto por tales autores debido a la existencia de un régimen transformante en esta zona y, por lo tanto, coincide más con el bloque sur de Colombia definido por Corredor (2003), quien para cerca a los 4°N plantea un régimen transformante deducido a partir de mecanismos focales de la base de datos mencionada. Similarmente, este mismo autor, para el bloque central de Colombia, resalta la tendencia inversa de las fallas con componente en el rumbo y con tendencia hacia el noreste, lo cual es consistente con el esfuerzo NW-SE deducido para la zona A.

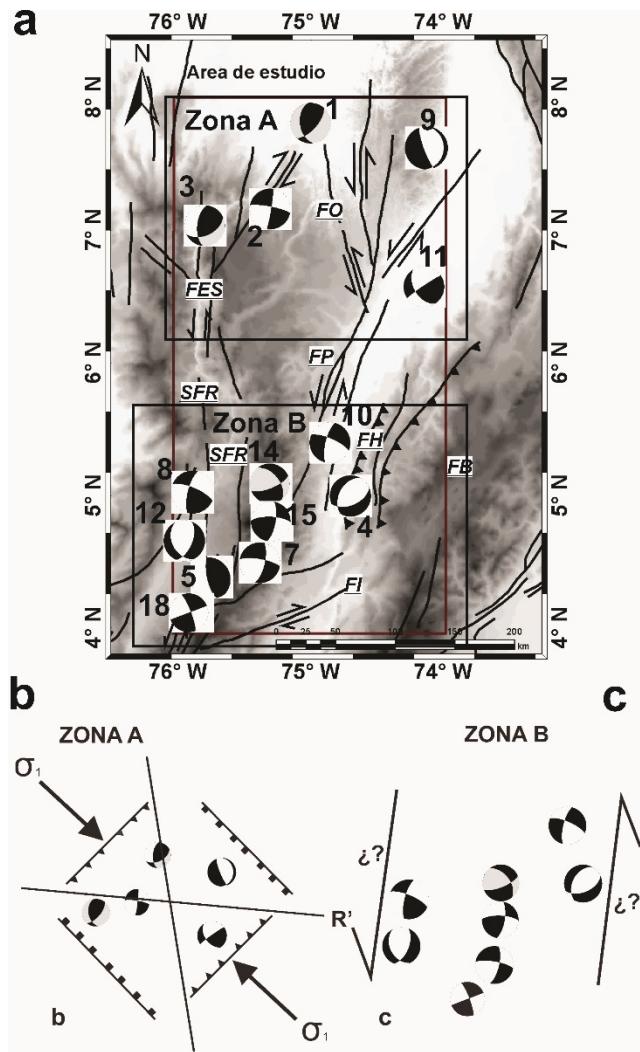


Figura 8. a) Mapa de fallas regionales y mecanismos focales hallados con los datos de la RSNC; SFR: Sistema de Fallas de Romeral; FI: Falla Ibagué; FB: Falla Bituima; FH: Falla Honda; FP: Falla Palestina; FO: Falla Otú; FES: Falla Espíritu Santo; b) En la zona A predomina un esfuerzo de compresión con tendencia SE-NW; c) La zona B, para los eventos corticales, muestra una tendencia mayoritaria al fallamiento de rumbo.

Fuente: Elaboración propia.

La relación de los mecanismos focales con las estructuras regionales muestra evidencia del estado de esfuerzo de la corteza. La Tabla 3 y la Fig. 9 resumen la disposición de cada mecanismo focal según la falla regional más cercana a su epicentro. Para los sismos generados sobre el Sistema de Fallas Cauca-Romeral (códigos 3, 8, 12 y 18) existe coherencia para los eventos 8 y 18, y aunque los eventos 3 y 12 sean inverso y normal respectivamente, esto se debe al comportamiento de un sistema de falla de rumbo en los que se presentan zonas asociadas a regímenes compresivos y extensivos debido a posibles inflexiones a lo largo de su traza.

La Falla Palestina (FP) presenta 4 mecanismos focales asociados, con códigos 10, 14, 15 y 7, en los cuales todos los diagramas tienen un plano nodal correspondiente al

movimiento sinistral que presenta esta falla. El mecanismo focal del evento 4 parece estar asociado a la Falla Honda (FH) que al indicar un comportamiento normal, no coincide con el campo de esfuerzo definido por Cortes y Angelier (2005) en la región donde se ubica la falla, donde debería tener una cinemática netamente inversa. El mecanismo focal muestra un posible comportamiento normal, de carácter local, que podría estar asociado a inflexiones o cambios en la curvatura de la traza de la falla, que generan desplazamientos locales de rumbo que pueden repercutir en la generación de áreas sometidas a transtensión. En la Falla Espíritu Santo (FES) se observan dos mecanismos focales: para el diagrama del evento 2 existe coherencia con el movimiento dextral de la falla, mientras que el diagrama del evento 1, al presentar componente inverso, no coincide con el componente normal asignado a la falla y puede representar una zona donde se localizan esfuerzos transpresivos. Los eventos 9 y 11 en su epicentro no coinciden exactamente con fallas regionales, pero presentan una asociación con los sistemas de fallas de

Tabla 3.

Relación del mecanismo focal del sismo con la falla regional más cercana a su epicentro, para los sismos con código 9 y 11 no fue posible asignar una falla que se asocie al evento.

FES: Falla Espíritu Santo, SFR: Sistema de Fallas de Romeral, FH: Falla Honda, FP: Falla Palestina.

Código Sismo	Falla	Régimen Falla	Régimen Mecanismo
1	FES	Régimen Sinistral con componente normal	Régimen compresivo con componente de rumbo
2	FES	Régimen Sinistral con componente normal	Régimen de rumbo
3	SFR	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen compresivo con componente de rumbo
4	FH	Componente Inverso	Régimen extensional
7	FP	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo
8	SFR	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo
9	-	-	Régimen extensional
10	FP	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo
11	-	-	Régimen de rumbo
12	SFR	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen extensional
14	FP	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo
15	FP	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo
18	SFR	Régimen sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo

Fuente: Elaboración propia.

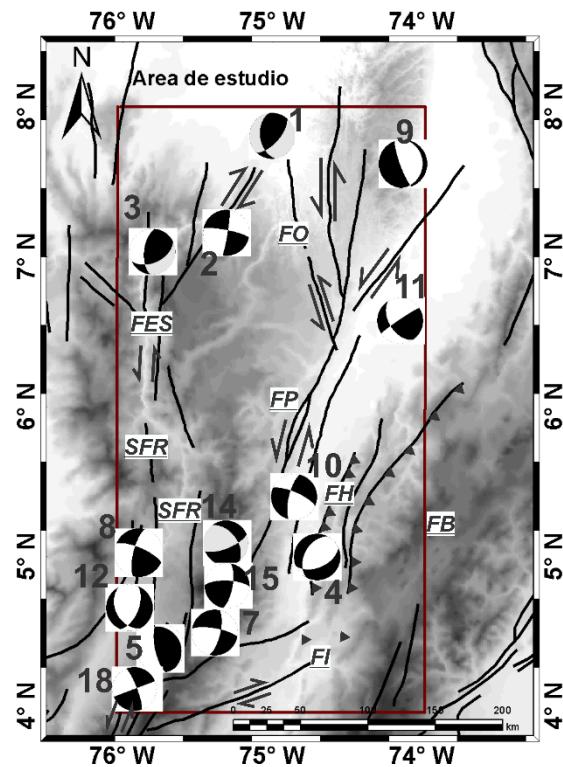


Figura 9. Mapa de mecanismos focales hallados y su relación con fallas regionales. SFR: Sistema de Fallas de Romeral; FI: Falla Ibagué; FB: Falla Bituima; FH: Falla Honda; FP: Falla Palestina; FO: Falla Otú; FES: Falla Espíritu Santo

Fuente: Elaboración propia.

Palestina y Otú. En particular, el evento 11, que sugiere un movimiento predominantemente de rumbo, muestra un posible plano de falla paralelo a la estructura regional, donde se infiere movimiento sinistral; el evento 9 puede corresponder a una zona de transtensión localizada.

6. Conclusiones

Después de recopilar sismos alrededor del Altiplano Antioqueño, registrados por la RSNC desde su densificación en el período 2008-2009, se identificaron dos zonas sísmicas, al norte y al sur de dicho altiplano, con regímenes predominantemente compresivo para la zona del norte y transtensión para la zona del sur. El cuadrángulo 76°W - 74°W y 8°N - 6°N, asociado a las fallas Espíritu Santo, Otú y norte de Palestina, corresponde a un régimen compresivo de dirección NE-SW, el cual puede asociarse a una reacomodación del bloque Panamá-Chocó. El cuadrángulo 5° 30' N - 4° N y 76°W - 74° W, relacionado con el sistema de fallas de Romeral, el sistema de fallas de Palestina al sur y la falla Honda, representa una zona con un régimen en el rumbo de componente sinistral.

El régimen compresivo establecido para la zona A (Fig. 8), al norte del Altiplano Antioqueño, con dirección NW-SE, es consistente con estudios anteriores de la distribución de esfuerzos en el Bloque Nor-Andino (Corredor, 2003, Cortes y Angelier, 2005). Para la zona B (Fig. 9), al sur del Altiplano

Antioqueño, se deduce un régimen transformante que genera fallas predominantemente sinistrales, a diferencia de la dominancia de la compresión propuesta por Cortés y Angelier (2005), y más consistente con lo propuesto para esta zona por Corredor (2003).

La parte central de la zona de estudio, donde se sitúan el Altiplano Antioqueño y la ciudad de Medellín y su Área Meropolitana, se encuentra libre de sismicidad frecuente de magnitud suficiente para establecer la presencia de fallas activas. Con un mejoramiento y densificación de la instrumentación sismográfica y acelerográfica allí presente, podrá establecerse la posible actividad de fallas en la zona y la presencia de sismicidad.

Referencias

- [1] Duque-Caro, H., The choco block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic and paleogeographic implications, *J. South Am. Earth Sci.*, 3(1), pp. 71-84, 1990. DOI: 10.1016/0895-9811(90)90019-W
- [2] Taboada, A., Rivera, L., Fuenzaldia, A. and Cisternas, A., Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia), *Tectonics*, 19(5), pp. 787-813, 2000. DOI: 10.1029/2000TC900004
- [3] Trenkamp, R., Kellogg, J.N., Freymueller, J.T. and Mora, H.P., Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations, *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), pp. 157-171, 2002. DOI: 10.1016/S0895-9811(02)00018-4
- [4] Cortés, M. y Angelier, J., Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes, *Tectonophysics*, 403(1-4) pp. 29-58, Jul. 2005. DOI: 10.1016/j.tecto.2005.03.020
- [5] Corredor, F., Seismic strain rates and distributed continental deformation in the northern Andes and three-dimensional seismotectonics of northwestern South America, *Tectonophysics*, 372(3-4), pp. 147-166, Sep. 2003. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00276-2
- [6] Restrepo-Moreno, S.A., Foster, D.A., Stockli, D.F. and Parra-Sánchez, L.N., Long-term erosion and exhumation of the 'Altiplano Antioqueño', Northern Andes (Colombia) from apatite (U-Th)/He thermochronology, *Earth and Planetary Science Letters*, 278(1), pp. 1-12, 2009. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.09.037
- [7] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Microzonificación y evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá, 2007.
- [8] Restrepo, J.J. and Toussaint, J.F., Terranes and continental accretion in the Colombian Andes, *IGCP*, 11(3), pp. 189-193, 1988.
- [9] Restrepo, J.J., Ordóñez-Carmona, O., Martens, U. y Correa, M., Terrenos, complejos y provincias en la cordillera central de Colombia, *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 9(2), pp. 49-56, 2009.
- [10] Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W. and Beltrán, A., Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia, *Lithos*, 125(3-4), pp. 875-896, Aug. 2011. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.05.003
- [11] Corredor, F., Eastward extent of the Late Eocene-Early Oligocene onset of deformation across the northern Andes: Constraints from the northern portion of the Eastern Cordillera fold belt, Colombia, *Journal of South American Earth Sciences*, 16(6), pp. 445-457, Dec. 2003. DOI: 10.1016/j.jsames.2003.06.002
- [12] Mora, A., Parra, M., Strecker, M.R., Kammer, A., Dimaté, C. and Rodríguez, F., Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia, *Tectonics*, 25(2), TC2010, pp. 1-19, 2006. DOI: 10.1029/2005TC001854
- [13] Mora, A., Reyes-Harker, A., Rodriguez, G., Tesón, E., Ramirez-Arias, J.C., Parra, M., Caballero, V., Mora, J.P., Quintero, I., Valencia, V., Ibañez, M., Horton, B.K. and Stockli D.F., Inversion tectonics under increasing rates of shortening and sedimentation: Cenozoic example from the Eastern Cordillera of Colombia, *Geological Society, London, Special Publications*, 377(1), pp. 411-442, 2013. DOI: 10.1144/SP377.6
- [14] Parra, M., Mora, A., Jaramillo, C., Torres, V., Zeilinger, G. y Strecker, M.R., Tectonic controls on Cenozoic foreland basin development in the north-eastern Andes, Colombia, *Basin Research*, 22(6), pp. 874-903, 2010. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2009.00459.x
- [15] Gómez, E., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W. and Cardozo, N., Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes, *Geological Society of America Bulletin*, 117(9-10), pp. 1272, 2005. Doi: 10.1130/B25456.1
- [16] Pennington, W.D., Subduction of the Eastern Panama basin and seismotectonics of northwestern South America, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11), pp. 10753-10770, 1981. DOI: 10.1029/JB086iB11p10753
- [17] Chiarabba, C., De Gori, P., Faccenna, C., Speranza, F., Seccia, D., Dionicio, V. and Prieto, G.A., Subduction system and flat slab beneath the Eastern Cordillera of Colombia, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(1), pp. 1-12, 2015. DOI: 10.1002/2015GC006048
- [18] Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva, J.C., Valencia, V., Ayala, C., Pérez-Angel, L.C., Rodríguez-Parra, L.A., Ramírez, V., and Niño, H., Middle Miocene closure of the Central American Seaway, *Science*, 348(6231), pp. 226-229, 2015. DOI: 10.1126/science.aaa2815
- [19] Álvarez, M., Ordóñez-Carmona, O.V. Marín, M. y Hernández, A.R., Geología de la zona de influencia de la Falla Otú en el distrito minero Segovia-Remedios, *DYNA*, 74(153), pp. 41-51, 2007.
- [20] Ego, F., Sébrier, M., Laveno, A., Yepes, H. and Egues, A., Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes, *Tectonophysics*, 259(1-3), pp. 101-116, 1996. DOI: 10.1016/0040-1951(95)00075-5
- [21] Cortes, R., Observaciones y descripciones petroloógicas y estructurales asociadas al tramo meridional de la Falla Palestina, *Geología Colombiana*, 17, pp. 211-218, 1990. DOI: 10.15446/gc
- [22] Dewey, J.W., Seismicity and tectonics of western Venezuela. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(6), pp. 1711-1751, 1972.
- [23] Franco, E., Rengifo, F., Llanos, D., Pérez, J., Bedoya, N., Bermúdez, M.L., Martínez, S., Duarte, J., Renginfo, R. e INGEOMINAS, S. D. A. G Sismicidad registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia durante el tiempo de operación: Junio de 1993 hasta agosto de 2002. En 1er Simposio Colombiano de Sismología, Bogotá, 2002
- [24] Shearer, P.M., *Introduction to seismology*. Cambridge University Press., 2009
- [25] Cronin, V., A primer on focal mechanism solutions for geologists. *Science Education Resource Center*, Carleton College, 2010.
- [26] Havskov, J. and Ottemoller, L., SEISAN earthquake analysis software. *Seismological Research Letters*, 70(5), pp. 532-534, 1999.
- [27] Crotwell, H.P., Owens, T.J. and Ritsema, J., The TauP Toolkit: Flexible seismic travel-time and ray-path utilities. *Seismological Research Letters*, 70(2), pp. 154-160, 1999.
- [28] Kennett, B.L.N. and Engdahl, E.R., Traveltimes for global earthquake location and phase identification, *Geophysical Journal International*, 105(2), pp. 429-465, 1991. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x
- [29] McClay, K.R., *The mapping of geological structures*. John Wiley & Sons, 1987.
- [30] Vargas, C.A. and Mann, P., Tearing and breaking off of subducted slabs as the result of collision of the panama arc-indenter with Northwestern South America, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(3), pp. 2025-2046, 2013. DOI: 10.1785/0120120328
- [31] Twiss, R.J. and Moores, E.M. *Structural geology*. Macmillan. 1992.

- [32] Marshak, S. and van der Pluijm, B.A., Earth structure: An introduction to structural geology and tectonics. New York: W.W. Norton & Company, Inc., 2004.
- [33] Fossen, H., Structural geology. Cambridge University Press., 2016.

G. Posada, obtuvo su grado en Ing. Geológica de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) en 2015. En la actualidad trabaja en el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y Valle de Aburrá (SIATA) y cursa la Maestría en Ingeniería – Recursos Minerales en la Facultad de Minas de la UNAL Sede Medellín.

ORCID: orcid.org/0000-0002-0797-7864

G. Monsalve, se graduó como Ing. Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) en el año 2001, y obtuvo su PhD en Geofísica de la Universidad de Colorado en Boulder, USA, en 2007. Actualmente trabaja como profesor asociado en la Facultad de Minas de la UNAL Sede Medellín.

ORCID: orcid.org/0000-0002-6029-3058

A.M. Abad, obtuvo su diploma en Ing. Geológica de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) en 2002, y su título de MSc. en Geología de la Universidad Federal de Oro Preto, Brasil, en 2005. Actualmente trabaja en la empresa de ingeniería INTEGRAL S.A., y además es profesora de cátedra en la Facultad de Minas de la UNAL Sede Medellín.

ORCID: orcid.org/0000-0001-6312-2484

Improvement of the breakage through the drilling deviations control, case “El Roble” mine, Colombia

Juan David Rincón-Durán & Jorge Martín Molina-Escobar

^a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jdrincond@unal.edu.co, jmmolina@unal.edu.co

Received: August 26th, 2016. Received in revised form: February 12th 2017 Accepted: May 08th, 2017

Abstract

In the unitary operation of drilling and blasting it is very frequent that errors associated with deviations from exploitation works occur. Errors such as improper positioning of the jumbo arm, little parallelism between perforations, irregular lengths of the holes and poor symmetry of the mining front, allow blasting to be inefficient. Thus, from the data measured at the “El Roble” mine, located in Chocó, there is an associated improvement in the use of tools such as magnetic inclinometer, the use of PVC guide tubes, the 5 m flexometer and the rigorous layout of the Mesh of drilling in the front, to assure the slope of the exploitation work and to reduce the deviations. In this way the progress of the exploitation work are improved above 90%, recovering lost tons by 90.2% and reducing costs per meter of advance by 13% is improved.

Keywords: Drilling; deviations; blasting.

Mejoramiento del arranque mediante el control de las desviaciones de perforación, caso mina “El Roble”, Colombia

Resumen

En la operación unitaria de perforación y voladura es muy frecuente que se presenten errores asociados a las desviaciones de las labores. Errores como el posicionamiento incorrecto del brazo del jumbo, poco paralelismo entre perforaciones, longitudes irregulares de los barrenos y la deficiente simetría del frente, hacen que la voladura sea ineficiente. Así, de los datos medidos en la mina “El Roble”, ubicada en el Chocó, se plantea una mejora asociada en el uso de herramientas como el inclinómetro magnético, el uso de tubos guía de PVC, el flexómetro y el trazado riguroso de la malla de perforación en el frente, para así asegurar la pendiente de la labor y reducir las desviaciones. De esta manera se mejoran los avances de las labores en cifras superiores al 90%, en recuperar las toneladas perdidas en un 90.2% y en reducir los costos por metro de avance en un 13%.

Palabras clave: Perforación; desviaciones; voladura.

1. Introducción

Las desviaciones presentadas en la perforación subterránea traen efectos en la voladura posterior. Además de no cumplir con los avances y toneladas de extracción esperadas, altera los parámetros de la voladura como el burden, el espaciamiento y genera una pobre distribución del tamaño fragmentado obtenido después de la voladura, afectando así el posterior ciclo de cargue y transporte. En sí las desviaciones se reflejan en re-perforaciones del frente, en el aumento tanto de la cantidad de explosivos usados, como

en el mayor consumo de energía por el sobreuso hecho en los equipos de perforación.

Los errores más comunes presentados durante la perforación en las labores subterráneas son la falta de simetría en la ejecución de la malla de perforación en el frente de explotación, además de las desviaciones de los barrenos, el paralelismo en las perforaciones y la irregularidad en los barrenos perforados. Las desviaciones por errores en la perforación están generalmente entre los 7° y 10°.

Aunque las desviaciones durante la perforación se pueden controlar, hay factores que no se pueden evitar como son los

How to cite: Rincón-Durán, J.D. and Molina-Escobar, J.M., Mejoramiento del arranque mediante el control de las desviaciones de perforación, caso mina “El Roble”, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, 42, pp. 45-54, Julio, 2017.

relacionados a las propiedades geológicas de la roca. Es posible tener un control sobre las desviaciones pero aspectos como la anisotropía de la roca, la resistencia y el tipo de roca son fundamentales en las desviaciones que se pueden presentar.

A partir de este trabajo se midieron las desviaciones presentadas en las labores, teniendo como base la pendiente topográfica a la cual se deben llevar. Lo anterior con el objetivo de poder calcular los avances y toneladas perdidas por causa de las desviaciones, para el caso de la mina El Roble, ubicada en el municipio de El Carmen de Atrato, Chocó.

La metodología a seguir consiste principalmente en el uso del inclinómetro magnético en el brazo del jumbo o jackleg, con el fin de medir las desviaciones en grados ($^{\circ}$) de la labor. Empleando además el uso de tubos PVC para corroborar las desviaciones y también mejorar el paralelismo, el uso del flexómetro de 5 m para medir las longitudes de los barrenos y evidenciar las irregularidades en las longitudes de perforación.

2. Marco teórico

2.1. Perforación y desviación

Singh (1998), definió la desviación de barrenos como la diferencia entre la localización planeada de la ubicación del barreno y el destino final del barreno. Pernía y López (1994), dijeron que **“Una buena perforación posibilita una buena voladura, pero una mala perforación asegura una mala voladura”**, por lo tanto se debe asegurar que la perforación se realice con calidad. Se entiende por perforación con calidad, aquella que se ha hecho con los medios y técnicas más adecuados y que además se ha ejecutado de forma correcta. Asimismo una buena voladura será aquella que cumple con el objetivo para la cual fue diseñada por los ingenieros de voladura [1,2].

La perforación de las rocas en lo relacionado al proceso de la voladura, es la operación primaria ya que tiene como objetivo la realización de los barrenos dentro del frente de explotación, con el fin de poder alojar los explosivos adecuados para la extracción del mineral de interés [1].

Los componentes principales de un sistema de perforación mecánico son:

- La perforadora: Fuente de energía mecánica.
- Varillaje: Medio de transmisión de dicha energía.
- La broca: Es quien ejerce la energía como tal sobre la roca.
- Fluido de barrido: Bien puede ser mediante agua o aire, éste efectúa la limpieza y evacuación del detritus producido.

2.2. Propiedades de la roca que afectan la perforación

Singh (1998), estudio el problema de la desviación de los barrenos asociado a las propiedades geológicas de la roca. Lo anterior tiene relación con la interacción roca-broca, que comprende el comportamiento de la broca en distintas

formaciones rocosas y respecto a la barra de perforación, que se relaciona al comportamiento de ésta bajo la acción de esfuerzos. Se está hablando de desviaciones, debido a las trayectorias que puede tener la broca-barra, por las propiedades geológicas de la roca y no por errores del operador durante la perforación. La desviación de los barrenos es causada por el carácter asimétrico de las fuerzas que actúan sobre la broca y la barra de perforación, siendo estas fuerzas provenientes de la estructura de la roca [2].

Está claro que perforaciones largas e inclinadas tienen mayor tendencia a desviarse respecto a perforaciones cortas, de la misma manera que diámetros de perforación pequeños tienen mayor tendencia a desviarse que diámetros mayores [2]. Lo anterior se pudo evidenciar en la mina El Roble, ya que al realizar perforaciones a mayor longitud en los frentes, por ejemplo de 3.8 m a 4 m, en vez de perforaciones cortas de 3 m, hay mayor posibilidad de tener desviaciones y por lo tanto la eficiencia en el avance obtenido llega a estar entre un 80 y 85 %.

Las propiedades geológicas de la roca son importantes ya que influyen en las desviaciones. La resistencia de la roca es fuertemente influyente en la desviación de las perforaciones. En rocas suaves las variables de las desviaciones se dan a tasas mayores, aquí la flexión de la barra causa un incremento en la fricción entre la barra, la broca y la pared del barreno perforado, trayendo como resultado la ampliación del diámetro del barreno. El incremento en el tamaño del barreno permite que la flexión de la barra se haga a una mayor velocidad, y los avances de frentes mayores respecto al valor planeado causa mayores desviaciones. La desviación es más pronunciada a mayores velocidades de rotación debido al aumento en la fuerza centrífuga, esto muestra porque se observa mayores desviaciones en roca suave que en roca más competente [2].

En rocas duras si no se excede la resistencia de ella no habrá fuerzas que actúen sobre la broca y la barra haciendo que esta pueda desviarse. En estas las desviaciones son mayores cuando la velocidad de penetración está por encima del valor del tipo de roca. La anisotropía de la roca también es fundamental en las desviaciones que se pueden presentar en la perforación, debido a las distintas resistencias que puede presentar la roca en distintas direcciones, esto muestra porque las desviaciones son mayores en esquistos que en shales [2].

La litología estratificada de la roca incide en que la barra-broca siga los planos de estratificación presentes (se deforme en su curso), y a medida que la perforación es más profunda la desviación que se puede dar es mucho mayor, como se observa en la Fig. 1 [2].

De igual forma el espesor es otra característica de la roca que influye en las desviaciones, observando mayores desviaciones en capas delgadas de roca que en capas más gruesas. En el caso de las capas delgadas en el momento que la barra va a recuperar su dirección inicial de perforación aparece otra capa que impide que pueda alinearse, lo contrario ocurre para capas gruesas donde la barra puede recuperar su dirección de perforación con mayor facilidad [2].

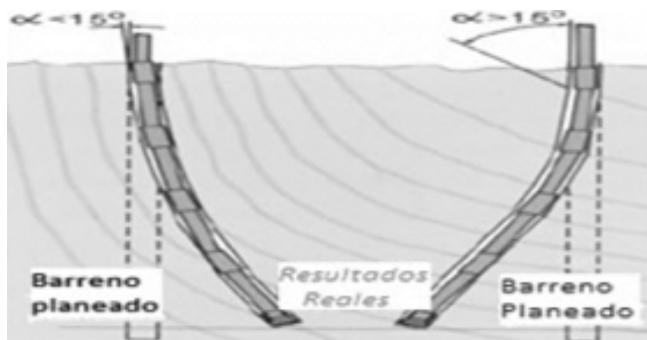


Figura 1. Desviación por estratificación estructural.
Fuente: [2].

2.3. Tipos de desviaciones

La desviación en la perforación de los barrenos, está dividida en 4 clases distintas: Error en la marcación de la perforación, desviación por alineación del brazo del jumbo, deflexión en la perforación y desviaciones profundas. A través de suma de vectores y pitágoras, se puede calcular la desviación total de las coordenadas del punto de perforación al cual se quiere llegar, a partir del punto actual de inicio de perforación. Esto se muestra en la Fig. 2 [3].

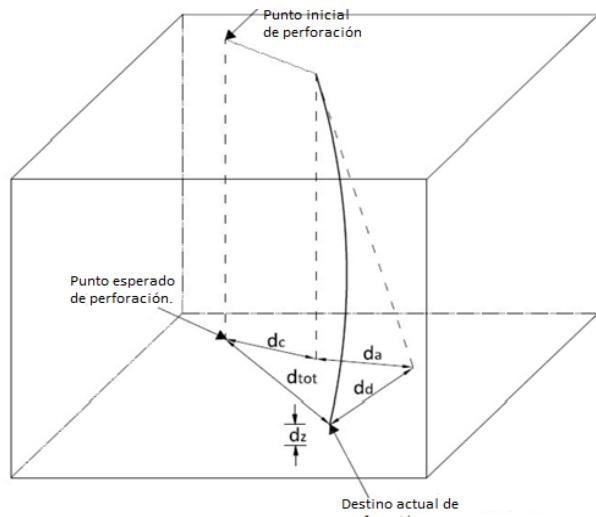


Figura 2. Representación en vectores de los tipos de desviaciones en perforación.
Fuente: [3].

En la Fig. 2 se muestran las desviaciones que se pueden presentar en la perforación. Partiendo desde un punto inicial planeado, llegando hasta el punto de destino perforado. Se muestra la desviación por error de marcación (dc), por alineamiento (da), por deflexión (dd) y desviaciones profundas (dz).

2.4. Efectos de las desviaciones en la operación unitaria de perforación y voladura

Hay una importante relación entre los parámetros de voladura (burden, espaciamiento, factor de carga, factor de

potencia, granulometría de roca, sobre-excavación) y su eficiencia. Es decir, si hay presencia de desviaciones en las perforaciones esto alterará los parámetros de voladura y consecuentemente afecta la eficiencia de la voladura. Con el fin de aumentar la calidad en la voladura, los parámetros de ésta se pueden controlar y estandarizar, pero se debe tener en cuenta que la perforación es el proceso inicial y del cual depende principalmente que la eficiencia de la voladura sea la esperada [4].

Adebayo (2015), definió el impacto que puede tener las desviaciones de las perforaciones. Reflejándose principalmente en el ciclo de producción, específicamente en el cargue, transporte y en el tratamiento del mineral en la planta. Lo anterior debido a los sobre-tamaños que se pueden presentar y la pobre fragmentación obtenida en la voladura. Estos problemas normalmente conllevan a segundas perforaciones, pérdidas de las varillas de perforación y accesorios, dilución y extracciones menores de mineral (ingresos menores), incremento del consumo de explosivos, tiempos perdidos y retrasos en las operaciones de producción de la mina [4].

Almgren y Klipmark (1981), observaron que las desviaciones en la perforación pueden incrementar los costos en la operación minera de US\$ 3/Ton a US\$ 4/Ton en la mayoría de los casos. Por lo tanto tener precisión en la perforación, resulta en un ahorro de un 15%. En los Estados Unidos los costos de dilución debido a las desviaciones y al daño por la voladura mal hecha han sido reportados en US\$ 25/ton de mineral [5].

Los costos asociados debido a las desviaciones en la perforación de los barrenos, se refleja en la Fig. 3. Se confirmó que los costos extras en perforación y voladura se incrementan (tienen correlación) a medida que se van presentando las desviaciones en la perforación [4].

El grafico de la Fig. 3 se modeló por Adebayo (2015) para un escenario implementando ANFO, broca de 191 mm de diámetro y burden de 4 m. La ecuación presente en la Fig. 3 que modela los costos extras asociados a las desviaciones, permite conocer estimativos de los costos que se pueden tener al presentarse desviaciones en las perforaciones [4].

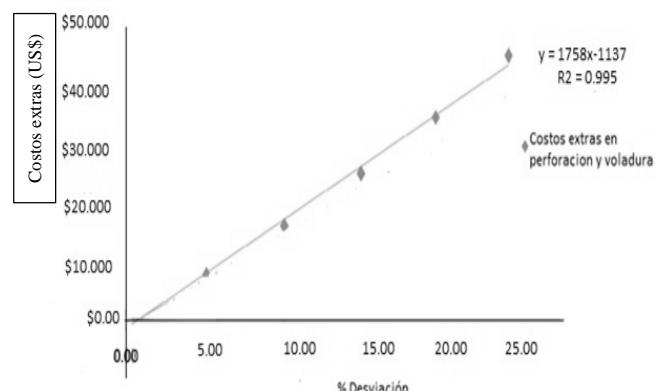


Figura 3. Costos extras en perforación y voladura y porcentaje de desviaciones (%).
Fuente: Adaptado de [4].

2.5. Efecto de la desviación de la perforación en la distribución del tamaño de fragmentación

Adebayo y Mutandwa (2015), estudiaron como afecta la desviación de los barrenos en la fragmentación de roca al hacer la voladura, y los costos extras por presentarse lo anterior mencionado. Estudiaron seis casos donde se variaron los parámetros de voladura como burden, espaciamiento, el diámetro de la broca y el tipo de explosivo. Los resultados mostraron que las desviaciones estuvieron en el rango de 0.1-0.5 m, y el promedio de la fragmentación varió de 332 mm para una desviación de 0.1 m hasta 289 mm para una desviación de 0.5 m [6].

Se concluyó que a medida que la desviación de las perforaciones se hacía mayor por falta de paralelismo y mayor distancia en el fondo entre las perforaciones, el tamaño de la fragmentación obtenida se hacía menor, lo cual produce "Fly Rocks" (esto indica pérdidas en la voladura); esto se refleja en el incremento en los costos extras en perforación. Estos fragmentos de roca se producen por las anomalías dadas durante la perforación (desviaciones) y diseño de la voladura, permitiendo la movilización de gases por las zonas más frágiles, así estos puedan salir con mayor facilidad por los barrenos (Rayna, 2015). Es importante la fragmentación obtenida, ya que ésta afecta las demás operaciones en la mina debido a los sobre-tamaños que se puedan obtener, además de incrementar los costos en voladura y perforación debido a las desviaciones que pueden presentarse [6,7].

Debido a las desviaciones, se obtienen irregularidades en el burden planteado en la malla (siendo este menor o mayor). Trayendo como consecuencia una pobre fragmentación de la roca y también manifestándose en vibraciones hacia el macizo rocoso. Si una perforación está desplazada 0.4 m del lugar al cual debería ir, esta puede reducir el poder del explosivo en cerca del 28 %. Por lo anterior se debe tener atención a las desviaciones, ya que además de disminuir los avances esperados, también afectan al macizo rocoso luego que la columna de explosivo es puesta en los barrenos, esto a la larga crea disturbios en el medio ambiente [6]. Los costos extras en perforación y voladura para los seis escenarios se muestran en la Tabla 1.

Después de la voladura es importante evaluar si la distribución de tamaño obtenida es la esperada. La fragmentación de rocas producto de la voladura puede variar por las condiciones en las cuales se realizó la perforación, es decir si hubo errores como desviaciones de barrenos lo cual distorsiona el burden planteado inicialmente [8].

Tabla 1.

Costos extras (US\$) en los casos de estudio.

Escenario	Costo extra en perforación y voladura (US\$)
A	10.631,39
B	23.769,34
C	15.274,49
D	36.093,07
E	16.392,46
F	36.093,07

Fuente: Los Autores.

La función de distribución tamaño de partícula de Rosin-Rammler (ec. 1), relaciona los parámetros de perforación y voladura para así estimar cómo se comportan los fragmentos de roca obtenidos. Esta función permite asociar las especificaciones en la fragmentación requerida en la trituración y molienda hacia la perforación y voladura, para calcular el 80% pasante del tamaño de partícula obtenido [8].

$$R = 100 * e^{-(\frac{x}{x_c})^n} \quad (1)$$

donde, R = es la fracción del material retenido

x_c = constante, llamada tamaño característico

x = tamaño de apertura de malla

n = es el índice de uniformidad

El índice de uniformidad es importante porque determina la forma de la curva que puede tomar la función de distribución de tamaño, éste toma valores entre 0.6 y 2.2. Un valor de 0.6 indica que los fragmentos no son uniformes (presencia de partículas menores, polvo) y un valor de 2.2 significa que los fragmentos de roca son uniformes (mayoría de los fragmentos de roca cercanos al tamaño medio). El índice de uniformidad (n) se calcula como se muestra en la ec. (2) [8].

$$n = n_s \sqrt{2 - \frac{30B}{d}} \sqrt{\frac{1+m_b}{2}} (1 - \frac{D_d}{B})^{l_{cb}} C(n)^{0.3} \quad (2)$$

donde, B = burden en (m)

d = diámetro del barreno en (mm),

D_d = desviación en perforación en (m),

m_b = relación entre el burden y el espaciamiento,

l_{cb} = longitud de carga en (m)

H_b = altura de banco en (m),

$C(n)$ = factor de corrección

n_s = factor de dispersión de los tiempos de retardo

Las desviaciones en perforación afectan la fragmentación a obtener, ya que influye en la generación de "Fly rocks" en la presencia de sobre-tamaños, además de afectar la ecuación de Rosin-Rammler [8].

Como se mencionó antes las desviaciones en perforación afectan el tamaño de partículas. Por lo tanto analizando la ec. (1) es posible concluir que los valores que tome el índice de uniformidad (n) afecta la forma que pueda tomar la curva de distribución tamaño de partículas después de la voladura. En la Fig. 4 se observa como varía el índice de uniformidad (n) para valores de desviaciones entre 1 y 3% [8].

Es posible concluir que para desviaciones mayores el índice de uniformidad (n) toma valores menores, es decir no hay uniformidad en la fragmentación de partículas y para desviaciones mayores los fragmentos de roca toman valores cercanos al valor medio, indicando que la perforación y la voladura cumplieron con el objetivo.

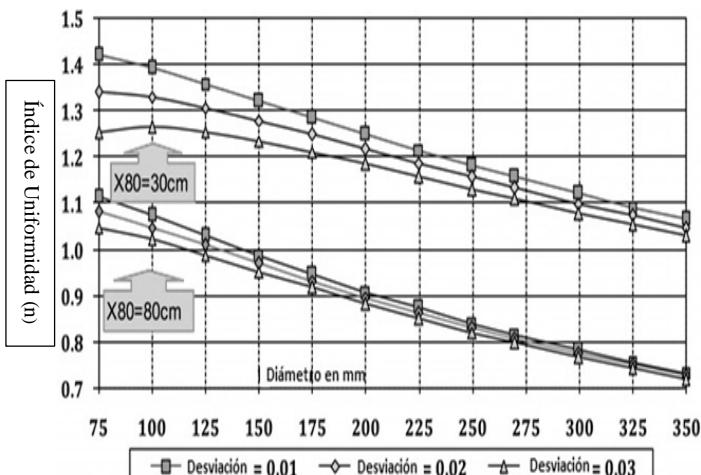


Figura 4. Cambios en el Índice de uniformidad por desviaciones en perforación.
Fuente: [8].

3. Metodología experimental

Se presenta la metodología que se siguió para el cálculo de las desviaciones en los barrenos, se explica cómo se hicieron las mediciones y que herramientas se emplearon para la toma de datos.

La metodología de trabajo consiste básicamente en medir las desviaciones de los barrenos (en ángulos) respecto a la pendiente de la labor, determinada por el área de planeamiento minero de la mina El Roble.

Estas desviaciones se midieron por medio del inclinómetro magnético, que es un dispositivo que se emplea en distintas áreas de la ingeniería, pero en este caso particular sirve para controlar las desviaciones en los barrenos. Entre las ventajas del uso del inclinómetro, tenemos menores errores de alineación de los barrenos, con lo cual es posible ampliar la malla de perforación y profundidad de los barrenos, reducir el consumo específico de los explosivos manteniendo la fragmentación y disminuir la sobre-excavación, costos de sostenimiento y los gastos energéticos; también permite disminuir las desviaciones en los barrenos pudiendo así garantizar el avance propuesto y las toneladas de extracción esperadas en el frente de trabajo. En la Fig. 5, se muestra el inclinómetro empleado para la medición de las desviaciones en los frentes.

En este orden de ideas la metodología de trabajo se basa de la siguiente manera:

Las mediciones se realizaron en la mina El Roble, durante las semanas 9, 10 y 12 del año 2016. Se midieron las desviaciones de barrenos en ángulos por medio del inclinómetro Johnson (el cual posee un fuerte agarre magnético), tanto en el Jumbo DD-321 (jumbo de dos brazos) y en el Jumbo DD-311 (jumbo de un brazo) que son los únicos dos jumbos presentes en la mina, así como también con la Jackleg, para labores más pequeñas como chimeneas o selladas (es decir, la apertura de un nuevo frente).

Las mediciones se realizaron colocando el dispositivo en el brazo del Jumbo (Fig. 6) antes de la perforación de los



Figura 5. Inclinómetro Johnson "Magnetic Protractor Angle Locator".
Fuente: Los Autores.



Figura 6. Inclinómetro colocado en brazo del Jumbo DD-321.
Fuente: Los Autores.

barrenos, es decir en el punto donde se realizará la perforación y con la pendiente que considere el perforista. Luego se retira el dispositivo y se inicia la perforación; esta metodología se realiza para todos los barrenos del frente, luego se calcula el promedio de la medición de los ángulos tomados (°).

Con la medición de la desviación de la labor, el objetivo consiste en comparar que tan desviado estaba la perforación según la pendiente topográfica, por lo tanto se realiza una conversión (mediante regla de tres) donde se observa la equivalencia en grados (°) de las labores y compararlo con la medida dada por el inclinómetro.

$$\begin{aligned} \text{Si } 45^\circ &\rightarrow 100\% \\ x &\rightarrow \text{pendiente de labor (\%)} \end{aligned}$$

Despejando la variable x , se obtiene la ec. (3) que permite hallar los grados equivalentes de la labor conociendo la pendiente de la labor (%) dada por el área de planeamiento de la mina El Roble.

$$x = (45^\circ) * \text{pendiente labor (\%)} / 100\% \quad (3)$$

El valor de x , corresponde a los grados equivalentes a la cual se debe de llevar la labor, es decir los grados o inclinación a los cuales se debe perforar en los frentes de trabajo.

Con base en lo anterior, se realizaron las mediciones de las desviaciones en las labores de la mina donde fue posible hacerla para los frentes en estéril (E) y en mineral (M). La roca de estudio posee características geomecánicas tales como RMR entre 35 y 45 con densidad promedio de 3.5 Ton/m³ para mineral, y RMR entre 20 y 25 con densidad promedio de 2.6 Ton/m³ para estéril. Siendo así se construyó la Tabla 2.

La Tabla 2 se compone de las labores a las cuales se realizaron las mediciones de desviaciones en grados, la inclinación de cada una de las labores establecida por el área de planeamiento de la mina El Roble y la conversión de la inclinación (desviación) a grados según la ec. (3), para así poder compararlo con la medición hecha por el inclinómetro.

De la Tabla 2 se puede observar que evidentemente hay desviación en las perforaciones, lo cual a la final repercute en la pendiente establecida a la cual se tiene que mantener la labor. A simple vista parecen desviaciones irrelevantes, pero éstas afectan notoriamente en los avances y tonelaje perdido de la mina, por lo tanto se le debe dar la atención correspondiente para disminuirlas.

Teniendo la inclinación de los barrenos en un frente dado se desarrolla el siguiente diseño mostrado en la Fig. 7, donde se refleja cómo se calcula el avance perdido por voladura, mediante la simulación de una perforación desviada y el ángulo B° a la cual se está desviando la perforación. El avance perdido se calcula utilizando relaciones trigonométricas.

Con base en la Fig. 7 se tiene que el avance perdido se halla según la ec. (4) :

$$\text{Cos}B^\circ = \frac{\text{Avance real (m)}}{\text{longitud perforacion (m)}}$$

Tabla 2.
Datos de mediciones con inclinómetro.

Labor	Inclinación (°)	Medición con inclinómetro (°)
TJ 1842-855 N (M)	0	10
TJ-3-E1 (M)	0	9
GA 1792-840 SE (M)	1.4	15
GA 1792-840 NW (M)	1.4	13
CA 1792-E4-2 (M)	0.5	12
VE 1919-944 SE (E)	5.6	14
CA 1792-E6-1 (M)	0.5	13
CH 1792-E4-3 SE (E)	6.8	12
CA 1792-W3-3 (M)	0.5	11

Fuente: Los Autores.

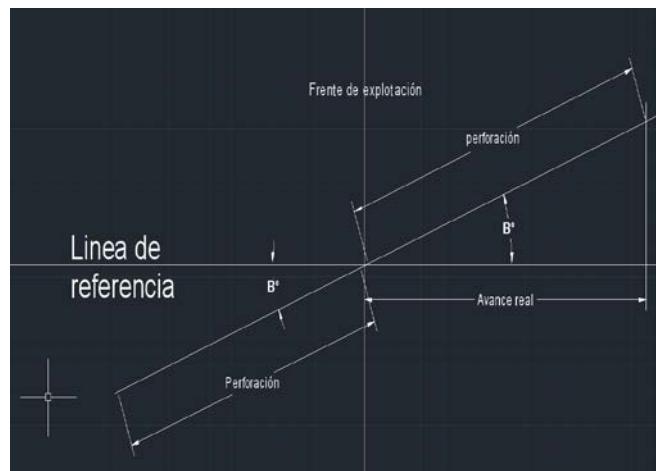


Figura 7. Simulación de perforación desviada para el cálculo de avances perdidos.

Fuente: Los Autores.

Obteniendo la ec. (4):

$$y (m) = \text{Cos}B^\circ * x(m) \quad (4)$$

donde B° = ángulo de desviación (°),
 y = avance real (m) &
 x = longitud de perforación (m)

Ahora se procede a calcular los avances reales esperados después de la voladura por desviación en la perforación, teniendo en cuenta la longitud de perforación a la cual se llevaron dichas labores y el ángulo de desviación que fue medido por el inclinómetro.

La perforación con jumbo en los frentes de la mina El Roble se hace con dos tipos de barras de distintas longitudes, una de 10 ft y otra de 14 ft, dependiendo de cuál sea el caso. Se exigió que para alcanzar un mayor avance en el frente se perfore con la barra de 14 ft para una longitud de perforación de 3 m, éste valor sería el valor teórico de la perforación. Pero en la práctica se observa que difícilmente se llega a este valor, la mayoría de los barrenos quedan con longitudes desiguales y desviadas entre sí.

A la hora de definir el avance teórico esperado que puede otorgar la voladura se tiene en cuenta la longitud de la perforación real por un factor del 90% de avance, ya que se sabe que la voladura no podrá avanzar a un 100% por las pérdidas que se puedan dar en el terreno, como bien puede ser factores geológicos, estructurales que afecten a la perforación y errores del operario. Ahora, teniendo claro lo anterior se realiza la Tabla 3, donde se muestra los avances reales dados por la desviación en la perforación y a la diferencia entre la perforación real y el avance real se tiene los avances perdidos durante la semana. De lo anterior se obtiene la Tabla 3, en la cual se muestra los avances perdidos para cada una de las labores estudiadas.

Tabla 3.
Avances perdidos.

Labor	Avance Real (m)	Avance perdido (m)	% perdido
TJ 1842-855 N	2.48	0.32	11.37
TJ-3-E1	2.27	0.28	11.11
GA 1792-840 SE	2.35	0.35	13.07
GA 1792-840 NW	2.46	0.34	12.31
CA 1792-E4-2	2.38	0.32	11.97
VE 1919-944 SE	1.22	0.18	12.67
CA 1792-E6-1	2.37	0.33	12.31
CH 1792-E4-3 SE	1.41	0.19	11.97
CA 1792-W3-3	2.56	0.34	11.65

Fuente: Los Autores.

4. Resultados y discusión

La propuesta de mejora se compone de implementar el Inclinómetro en los dos jumbos de la mina, en el DD-311 y el DD-321, así como en las Jackleg para las chimeneas y frentes de dimensiones menores (2x2 m de sección).

Con el empleo del inclinómetro se pretende asegurar las pendientes de las labores establecidas por el área de planeamiento de la mina El Roble, a las cuales muy poco se están llevando.

Además del uso del inclinómetro, éste se complementa con tubos guiaadores de PVC, para así tener paralelismo en los barrenos, así como el trazado de la malla de perforación para asegurar la geometría de cada una de las partes del frente, además de perforar con longitudes parejas cada uno de los barrenos. Si se va a usar la barra de 14 ft, hacer marcación de ésta hasta los 3 m, para que así no haya irregularidades en las longitudes de perforación. De igual manera apoyarse con el flexómetro de 5 m para asegurarse de tener parejo las longitudes de los barrenos a perforar. En la Tabla 4, se muestra las herramientas a usar para la mejora en los avances de los frentes de explotación después de la voladura.

En lo relacionado al uso de los tubos guiaadores de PVC, consiste en ubicar los tubos en los barrenos, para que estos sirvan como guía durante la perforación, permitiendo así la fácil ubicación de la broca en el frente y conservar el paralelismo para los próximos barrenos por perforar, como se muestra en la Fig. 8.

En la Fig. 8 se observa un tubo PVC puesto en el cuadrador superior-izquierdo, con el objetivo de perforar el cuadrador superior-derecho. Por lo tanto la inserción del tubo en dicho barreno permite al perforista tener una mayor visión y precisión en la ubicación de la broca a la hora de perforar, conservando así el paralelismo entre los dos barrenos.

Tabla 4.
Herramientas empleadas para mejorar los avances en los frentes de explotación.

Herramientas para mejorar perforación

Inclinómetro magnético
Tubos guiaadores de PVC
Trazado de la malla en frente con aerosol, por topografía
Marca de barra de jumbo hasta 3 m (aerosol)
Flexómetro de 5 m, para medir longitud de perforación

Fuente: Los Autores.

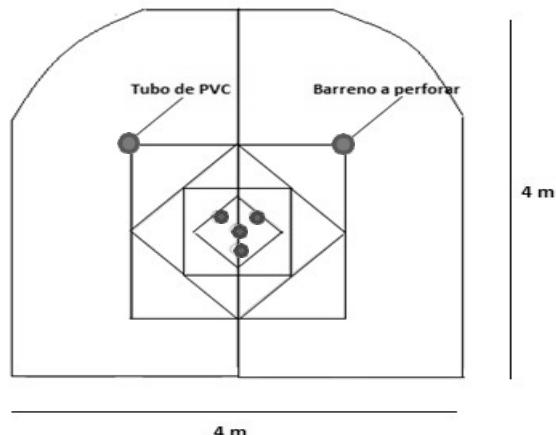


Figura 8. Ubicación de los tubos de PVC.

Fuente: Los Autores.

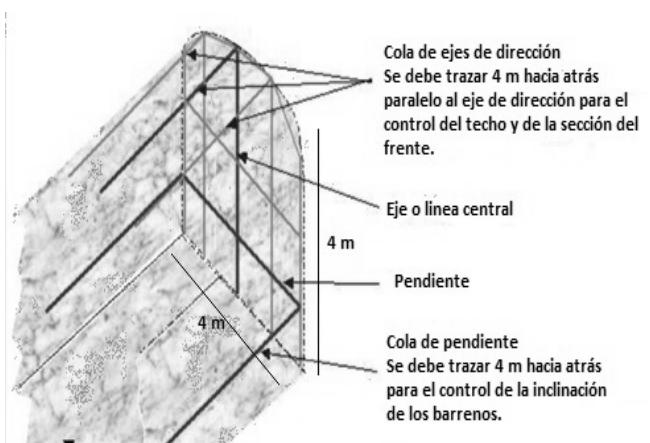


Figura 9. Trazado de malla de perforación.

Fuente: Adaptado de [1].

El trazado de la malla de perforación en el frente consiste en el dibujo de la pendiente de la labor, para así con ayuda del inclinómetro poder mantener la labor a la pendiente deseada y evitar posibles desviaciones. Además de trazar con aerosol las partes correspondientes al frente, y así tener una guía a la hora de la ubicación de los barrenos, esto se muestra en la Fig. 9.

De la Fig. 9 es posible observar la pendiente, además se traza la cola de la pendiente metros hacia atrás. Esto con el fin de poder controlar la inclinación de los barrenos. Además se traza el eje del frente, y se dibuja a distancias equidistantes según la sección del frente a partir del eje y los hastiales, dos líneas más que permiten tener el trazado de la malla del frente para una guía de referencia a la hora de llevar a cabo la perforación.

Ahora bien teniendo claro lo anterior, se realiza un análisis de los costos asociados por metro de avance dependiendo del tipo de frente que se esté trabajando. Lo anterior es importante, ya que así se tiene mayor claridad de porque se debe asegurar los avances en los frentes después de la voladura.

Tabla 5.
Costos por metro de avance.

	Tipo de labor US\$/m	Promedio 2015 (US\$)
Estéril (E)	CA 3,5 x 3,5 E	211
	RP 4,0 x 4,0 E	209
	VE 2,0 x 2,0 E	95
	VE 3,8 x 3,8 E	145
Mineral (M)	GA 3,5 x 4,0 M	329
	GA 4,5 x 4,0 M	309
	CA 3,5 x 4,0 M	260
	CA 4,5 x 4,0 M	309
	CH 2,0 x 2,0 M	82
	TJ 4,0 x 4,0 M	117

Fuente: Los Autores.

Tabla 6.
Pérdidas diarias en dólares por incumplimiento en avances.

Labor	US \$/m	Pérdidas diarias (US\$)
TJ 1842-855 N	117.00	37.24
TJ-3-E1	117.00	33.14
GA 1792-840 SE	329.00	116.07
GA 1792-840 NW	329.00	113.37
CA 1792-E4-2	260.52	84.17
VE 1919-944 SE	95.96	17.03
CA 1792-E6-1	260.52	86.57
CH 1792-E4-3 SE	82.00	15.70
CA 1792-W3-3	260.52	88.04
Total \$ 591.33		

Fuente: Los Autores

Se debe tener en cuenta que no hay valor único o estándar en los costos por metro de avance (US\$/m) asociado para todas las labores, ya que hay labores donde debido a su importancia en el desarrollo de la mina, a su sección y si es mineral (M) o estéril (E) adquieren un valor distinto respecto a las demás. Lo mencionado se observa en la Tabla 5 suministrada por el área de costos de la mina El Roble, en la cual se muestra un promedio de los costos con base en el año 2015.

Ahora teniendo en cuenta que la toma de datos se hizo para cámaras de mineral de 3.5x3.8 m, para galerías de mineral de 3.5x3.8 m, para ventanas de estéril y chimenea de mineral de 2x2 m y por último para bresting (tajos) de 4x4 m de sección; es posible saber las pérdidas asociadas a los avances ineficientes en la empresa. En la Tabla 6 se muestra las pérdidas diarias (US\$) asociadas a los avances perdidos para cada una de las labores estudiadas.

En la Fig. 10 se muestra la relación de los avances incumplidos, con el dinero que se pierde por día, por no obtener la longitud de avance esperado.

Ahora se calculan las pérdidas anuales, para así tener una mayor idea de las importantes cantidades de dinero que se están perdiendo en la mina al año. Lo anterior se ve reflejado en la Tabla 7.

De la Tabla 7 se observa que al año se están teniendo pérdidas cercanas a los 170.303,22 dólares por no cumplir con los avances esperados en las labores respecto a la perforación real.

Para el mejoramiento en el proceso de perforación y voladura en la mina El Roble se implementó el uso del inclinómetro, asegurando

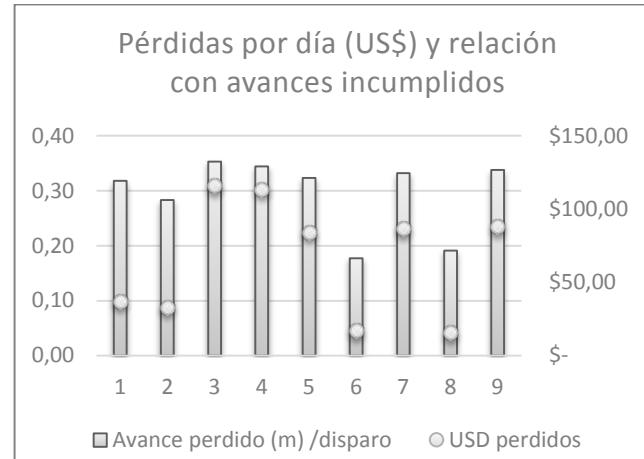


Figura 10. Gráfico de pérdidas diarias (US\$) y relación con avances incumplidos.

Fuente: Los Autores.

Tabla 7.
Pérdidas por año por incumplimientos en avances.

Labor	Pérdidas/año (US\$)
TJ 1842-855 N	10.724,91
TJ-3-E1	9.544,57
GA 1792-840 SE	33.428,53
GA 1792-840 NW	32.650,35
CA 1792-E4-2	24.242,22
VE 1919-944 SE	4.903,47
CA 1792-E6-1	24.930,94
CH 1792-E4-3 SE	4.521,70
CA 1792-W3-3	25.356,54
Total	170.303,22

Fuente: Los Autores.

Tabla 8.
Mejora en los avances.

Labor	Avance Real (m)	% Avance cumplido
TJ 1842-855 N	2,50	99.21
TJ-3-E1	2,30	100.00
GA 1792-840 SE	2,41	99.18
GA 1792-840 NW	2,50	99.21
CA 1792-E4-2	2,42	99.59
VE 1919-944 SE	1,24	98.41
CA 1792-E6-1	2,42	99.59
CH 1792-E4-3 SE	1,43	99.31
CA 1792-W3-3	2,60	99.62

Fuente: Los Autores.

así que la labor estuviera llevándose a la pendiente que establecía el área de planeamiento de la mina, el uso de tubos guiaores de PVC y por último el mantener la geometría en los barrenos, mediante el trazado de la malla de perforación por los topógrafos.

Con base en lo anterior es posible observar que hubo mejora en los avances reales respecto al avance teórico por el uso del inclinómetro, como se observa en la Tabla 8.

Tabla 9.
Disminución en costos por metro de avance después del uso del inclinómetro.

Labor	Pérdidas/año(US\$)
TJ 1842-855 N	10.108,80
TJ-3-E1	8.424,00
GA 1792-840 SE	27.478,08
GA 1792-840 NW	28.425,60
CA 1792-E4-2	21.008,33
VE 1919-944 SE	4.421,84
CA 1792-E6-1	21.008,33
CH 1792-E4-3 SE	4.014,72
CA 1792-W3-3	22.508,93
Total	147.398,63

Fuente: Los Autores.

Tabla 10.
Resumen de resultados.

Dinero recuperado (US\$) y Porcentaje de ahorro %	
% Ahorro de dinero por incremento en avance	13
Dinero recuperado/año (US\$)	22.904,59

Fuente: Los Autores.

Después de realizar la propuesta de mejora, como se observa en la Tabla 8, los avances en los frentes de explotación mejoraron, llegando a cumplirse en un 99 % respecto al avance teórico, el cual como se mencionó anteriormente es el esperado a alcanzar con la voladura. Con los datos de la Tabla 7, es posible calcular como disminuyen anualmente las pérdidas en dólares. Se enfatiza que cumplir los avances respecto a la longitud de perforación real del barreno es poco probable lograrlo, ya que como se dijo inicialmente siempre van a ver pérdidas asociadas a factores geológicos, geomecánicos y estructurales de la roca. Pero con la realización de la propuesta de mejora, se puede lograr llegar a valores de avances cercanos al avance teórico esperado de la perforación.

La propuesta de mejora permite recuperar 9.989 Ton respecto a las 11.074 Ton/año que se están perdiendo, esto equivale a un 90.2% de Ton/año que se pueden extraer respecto a las no extraídas.

En la Tabla 9 se muestra como disminuyen las pérdidas por metro de avance incumplidos (US\$), debido a las mejoras en los metrajes de los avances con un porcentaje de ahorro (US\$) correspondiente al 13%.

En la Tabla 10 se muestra un resumen de la reducción de costos que se puede tener por cumplir con los metros de avances de las labores.

De la Tabla 10 se puede observar que al año se puede ahorrar un monto de dinero cercano a los 22.904,59 US\$, por incrementar los avances de los frentes de explotación. De lo anterior es posible confirmar que en la operación unitaria de perforación y voladura hay cantidades importantes de dinero invertidas. El objetivo es siempre establecer la metodología correcta para así disminuir los costos, los tiempos y aumentar la eficiencia en cuanto a la perforación hecha del frente y la voladura posterior.

5. Conclusiones

- Con la propuesta de mejora se comprobó que se puede tener una reducción en costos (US\$) del 13%, por cumplir con los avances esperados en los frentes de explotación.
- Con la propuesta de mejora se comprobó que es posible recuperar en un 90.2% las toneladas que se estaban perdiendo, a raíz de no avanzar lo esperado en las labores de la mina.
- Con el uso del inclinómetro magnético y de las herramientas de apoyo para éste, los avances obtenidos estuvieron muy cerca del avance teórico, ya que se pudo llegar a valores mayores del 90 %.
- Las desviaciones presentadas en los frentes medidos, estuvieron cercanos al valor teórico de 10°. Lo anterior se evidencia ya que los valores medidos en los frentes de estudio estuvieron por los 11° de desviación.
- Con el uso del inclinómetro magnético y complementarlo con las herramientas de apoyo como los tubos PVC, trazado de la malla en frente con aerosol y flexómetro de 5 m, se puede tener mejoras en los avances y en las toneladas a extraer. Por lo tanto ahorro en el consumo de explosivos, menores impactos al macizo y ahorros en gastos de energía y dinero.
- La perforación y la voladura son conjutas, por lo tanto una buena perforación asegura una buena voladura. La perforación es la base para que la voladura salga de la mejor manera, se dice que la perforación aporta el 70% de la voladura, por lo tanto el porcentaje restante solo está en hacer un carguío correcto acorde al frente a explotar, teniendo en cuenta el tipo de roca y factores geomecánicos.

Agradecimientos

Los autores expresan su profundo agradecimiento a la empresa Miner S.A, en especial al área de Planeamiento Minero, por permitir y promover estas investigaciones. De igual forma a EXSA S.A, por las asesorías e ideas aportadas en el desarrollo de esta publicación.

Referencias

- [1] Pernia, J. y López, C., Instituto Geológico y Minero de España: Manual de perforación y voladura de rocas. España, 1994, pp.1-348.
- [2] Singh, P., The effects of rock mass characteristics on blasthole deviation. CIM Bulletin, 91(1016), pp.90-93, 1998.
- [3] Oslen, V., Rock quarrying: Prediction models and blasting safety, Dr. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2009, 193 P.
- [4] Adebayo, B. and Akande, J., Effects of blast-hole deviation on drilling and muck-pile loading cost. International Journal of Scientific Research and Innovative Technology, 2(6), pp.64-73, 2015.
- [5] Almgren, G. and Klippmark, K., Economic aspects on hole deviation in sublevel stopping, in Conference Caving and Sublevel Stopping (1981, Denver), Denver, USA, University of Technology, Lulea, 1981, pp.559-573.
- [6] Adebayo, B. and Mutandwa, B., Correlation of blast-hole deviation and area of block with fragment size and fragmentation cost.

- International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2(7), pp. 402-406., 2015.
- [7] Rayna, A., Murthy, V. and Soni, A., Flyrock in surface mine blasting: Understanding the basics to develop a predictive regime. Current Science, 108(4), pp.660-665, 2015.
- [8] Arshad, M., The effect of fragmentation specification on blasting cost MSc. Thesis, Queen's University, Ontario, Canada, 2009, pp.1-192.

J.D. Rincón-Durán, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, graduado en el año 2016. Actualmente trabaja en la Secretaría de Minas de la Gobernación de Antioquia en Fiscalización Minera.
ORCID: 0000-0003-1206-4485

J.M. Molina-Escobar, es Dr. en Recursos Naturales y Medio Ambiente 2008 de la Universidad Politécnica de Cataluña, MSc. en Ingeniería de Geosistemas 1997 de la Universidad de Tokio, Ing. de Minas y Metalurgia 1989 de la Universidad Nacional de Colombia. Laboró en minas de oro, de carbón; consultor investigador. Actualmente profesor de la Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
ORCID: 0000-0002-6068-2571

Education in Geology on the Escuela Nacional de Minas de Medellín, 1910-1937

Yohana Josefa Rodríguez-Vega & Yobenj Aucardo Chicangana-Bayona

Facultad de Ciencias Humanas y Económicas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. yjrodrig@unal.edu.co, yachican@unal.edu.co

Received: February 10th, 2017. Received in revised form: May 22th, 2017. Accepted: June 29th, 2017.

Abstract

This article analyzes the process of teaching and production of geological knowledge, as contents of Mining and Civil Engineering, in the program of the National School of Mines in Medellin, between 1911 and 1937. It was articulated in two main areas: the teachers who were in charge of this subject and methodology of study taught following the policy of the institution, regarding the apprehension of the concepts seen in the classroom, to be applied in field work, and of course in professional life would face as engineers. Likewise, the relationship had teaching geology at the School with some business sectors and the national and regional government.

Keywords: Geology; Antioquia; Escuela Nacional de Minas; Education.

La enseñanza de la geología en la Escuela Nacional de Minas de Medellín, 1910-1937

Resumen

El presente artículo analiza el proceso de enseñanza y producción de la geología, como contenido de la carrera de Ingeniería Civil y de Minas, en la Escuela Nacional de Minas de Medellín, entre los años 1911 y 1937; articulado en dos ejes principales: los docentes que tuvieron a su cargo ésta asignatura y la metodología de estudio impartida siguiendo la política de la Institución, concerniente a la aprehensión de los conceptos vistos en el aula, para ser aplicados en las tareas y salidas prácticas a campo, y por supuesto en la vida profesional que afrontarían como ingenieros. Asimismo, presenta la relación que tuvo la enseñanza de la Geología en la Escuela con algunos sectores empresariales y del Gobierno Nacional y Departamental.

Palabras clave: Geología; Antioquia; Escuela Nacional de Minas; Educación.

1. Introducción

En el marco de los actuales estudios de historia de las ciencias, Mendoça (2009) [7] propone que la Geología como disciplina surgió en medio de los debates y la tensión dialéctica entre la historia y la filosofía natural, y de la convergencia de las diferentes metodologías utilizadas por estas dos ramas del conocimiento. De la historia natural se recopilaron la presentación de trabajos descriptivos y la proposición de teorías, que fueron el fruto de la generalización de un conjunto de datos empíricos. Y de la filosofía natural se tomaron las explicaciones totalizadoras de los fenómenos, a partir de las hipótesis y conclusiones verificables *a posteriori* [7].

En el contexto del positivismo científico, la geología se enmarca en el ámbito de las ciencias aplicadas, cuyas cualidades incluyen el estudio de procesos que implican un número considerable de variables (tiempo, espacio, lugar, formas, entre otros) y escalas de gran magnitud, que en ocasiones no son comprobables en laboratorio, y por el contrario, deben analizarse a la luz de la observación de los trabajos de campo. Sin embargo, la historia de la disciplina geológica ha proporcionado nuevas visiones sobre la forma y los procesos como han surgido, transformado y aplicado las ideas geológicas y que, según Kuhn y Frodeman, han sucedido en el marco de un conjunto de logros científicos, que proporcionaron una explicación a varios descubrimientos adelantados en el ámbito de la geología, tales como el tiempo

How to cite: Rodríguez-Vega, Y.J. and Chicangana-Bayona, Y.A. La enseñanza de la geología en la Escuela Nacional de Minas de Medellín, 1910-1937. Boletín de Ciencias de la Tierra, 42, pp. 55-63, Julio, 2017.

geológico, el origen de las rocas y la revolución de la tectónica de placas, entre otros. Descubrimientos alcanzados en medio de sociedades e instituciones que promovieron, analizaron y transformaron estas ideas que determinaron, en buena medida, la validación de la geología como disciplina [3].

De otro lado, este conocimiento ha llegado hasta nosotros a partir de las posturas que ha brindado la historia de las ciencias, al querer comprender y entender cómo se formularon y conformaron los conceptos estructurales de esta disciplina, y a su vez, como fueron enseñados. De acuerdo a Mendonça, este es “un concepto cuya construcción transforma el sistema cognitivo, permitiendo adquirir nuevos conocimientos, organizar los datos de otra manera, transformar inclusive los conocimientos anteriores” [7].

Con base en las propuestas de Mendonça (2009) [7], el artículo tiene como objetivos contribuir al conocimiento de la historia de la disciplina geológica, mostrando su proceso de emergencia en la Escuela Nacional de Minas de Medellín (en adelante ENMM), entre los años 1911 y 1937, periodo en el cual la enseñanza de la geología se fortaleció gracias a las iniciativas de investigación forjadas por los gobiernos nacional y departamental, la reforma académica de la Escuela en 1912 y la metodología que allí se implementó para la enseñanza de la geología, con fines de lograr que los estudiantes obtuvieran un mejor conocimiento de la estructura de esta disciplina.

El otro objetivo principal de este escrito es mostrar que durante ésta época fue posible contribuir a una mayor comprensión y conocimiento de la geología del Departamento de Antioquia, gracias a la convergencia de varias acciones que se adelantaron en el país, como lo fueron la fundación del Instituto de Ciencias Naturales de la Salle (1912), la creación de la Oficina Nacional de Longitudes (1919), la Comisión Científica Nacional (1916), el lanzamiento del Boletín de Minas y Petróleos (1929), éstas últimas tres pertenecientes al Ministerio de Industrias, las publicaciones adelantadas por docentes y estudiantes de la Escuela Nacional de Minas en las Revista DYNA (1933), y el Periódico de Anales de la Facultad de Minas (1923). La contratación de geólogos extranjeros que vinieron al país para coordinar las labores de exploración y búsqueda de hidrocarburos (1923), participar como docentes de las cátedras de Geología General y Geología Práctica en la ENMM y formar a nuevos profesionales en ésta área del conocimiento. Estos profesionales se convirtieron en 1941 en los gestores de la creación de la carrera de Ingeniería de Geología y Petróleos en la misma Escuela y salieron fuera del país para formarse como especialistas.

Por último resaltar el valor de los archivos que salvaguarda la Universidad Nacional de Colombia, como fuente de estudio para la historia de la ciencia forjada en nuestra universidad, entre ellos el Archivo Histórico de la Sede Medellín, la Colección valiosa de la Facultad de Minas que se ubica en la Biblioteca Hernán Garcés y el Archivo del Museo de Geociencias de la Facultad de Minas, utilizados para la consulta de la información del artículo aquí presentado.

2. Reconocimiento de la geología de Antioquia en los trabajos de la Comisión Científica Nacional

A principios del siglo XX, el gobierno nacional adelantó el proyecto de creación de la Comisión Científica Nacional (1916-1938) [12], en adelante CCN, y para lo cual recomendó la dirección de ésta a extranjeros especializados, en cada una de sus cinco etapas que la constituyeron, casi todos ellos alemanes, a saber: Robert Scheibe (1859-1923), Emil Grosse (1903-?), Enrique Hubach (1896-1968) y Otto Stutzer (1881-1936).

La CCN constituyó un intento del gobierno nacional por adelantar el estudio geológico del país, que se llevó a cabo mediante la Ley 83 de 1916, y cuya duración fue un poco más de 20 años. Las memorias de esta Comisión se compilaron en diez tomos de la serie *Compilación de Estudios Geológicos Oficiales en Colombia* (1933-1960).

Asimismo, esta comisión fue la antecesora del Servicio Geológico Nacional. Después de su culminación en el año 1934, el geólogo alemán E. Hubach, último director de ésta, entró a desempeñarse como Director del Servicio Geológico Nacional, dependiente del entonces recién creado en 1939 Ministerio de Minas y Petróleos, promovido como una entidad necesaria para estudiar y levantar los mapas geológico, hidrográfico y topográfico del país, como consta en esta cita:

“[...] El conocimiento científico de nuestros recursos minerales, de las características del suelo y subsuelo de las diversas comarcas, del régimen, distribución, modalidades y aprovechabilidad de las fuentes de agua, y del relieve preciso que afecta el territorio, es condición indispensable para que el país pueda avanzar por la senda de progreso que ha principiado a recorrer [...]” [2].

Uno de los obstáculos principales que tuvo que solucionar la CCN fue la falta de bases topográficas, que retrasó el inicio de las actividades. Esta razón condujo a los miembros de la Comisión a trazar croquis dibujados en dos escalas, 1:5.000 y 1:10.000, sobre los datos de una plancha topográfica, que contenían variables como caminos, vías, corrientes de agua, etc., las alturas de las curvas de nivel y las cotas de un buen número de puntos fijos tomados en el campo. Estas características permitieron un acercamiento al relieve del suelo, en asociación con la colocación de los estratos, la tectónica y los límites geológicos, como por ejemplo el cauce de una quebrada, que la constituyó una línea de falla, o el contacto de dos formaciones geológicas o grupos de rocas disímiles, que facilitaron la representación tridimensional de la geología de los territorios cartografiados [12].

La CCN inició labores en el Suroeste del departamento de Antioquia en el año 1919, en una región comprendida entre las Cordilleras Central y Occidental. La elección de esta región obedeció principalmente al interés económico (carbonos de la formación Amagá), y porque se contaba con información topográfica, que fue levantada por las empresas mineras de El Zancudo y el Ferrocarril de Antioquia. Se conoció entonces la topografía del trazado de la vía férrea que comunicó esta región con la capital del departamento, al igual

que las coordenadas de las poblaciones que les fueron brindadas por la Oficina de Longitudes [12].

Para dirigir esta investigación se contrató al ingeniero alemán Robert Scheibe, quien debió: “seleccionar regiones importantes y variadas del Departamento, donde fijaría los tipos petrográficos y estratigráficos, las relaciones de los yacimientos de los minerales útiles y el desarrollo de las rocas eruptivas y la estructura de la región” [12]. Con el objetivo de adelantar las tareas anteriormente enunciadas, contó con la ayuda del topógrafo Luis Uribe y del geólogo Carlos Gutiérrez. Desafortunadamente este último abandonó el trabajo sin completar las observaciones hechas en la región, mientras que el geólogo alemán se dedicó a la exploración de otros lugares.

La Gobernación de Antioquia exigió a esta Comisión la entrega de una plancha geológica en un tiempo de tan solo cuatro meses, sumado a esto se presentaron diferentes inconvenientes que incluyeron el bajo presupuesto, la falta de planchas topográficas y la ausencia de personal capacitado para llevar a cabo esta tarea. Estas razones, sumadas al hecho de haber sido llamado por el Gobierno Alemán para regresar a su país, provocaron la renuncia del geólogo Scheibe de su cargo en la Comisión. Aunque Scheibe no cumplió la ambiciosa solicitud del gobierno antioqueño de levantar un mapa geológico del Departamento, si entregó un informe al Ministerio de Obras públicas con los resultados de la Comisión en Antioquia, acompañados de un croquis en el que quedó una topografía marcada con los rasgos generales de la geología de Antioquia [12].

3. La Comisión Científica Nacional y la enseñanza de la geología en la ENMM

Luego de la renuncia de Scheibe a la Comisión Científica Nacional, la Junta Directiva de la ENMM le ofreció un cargo como docente de las asignaturas de Geología Práctica o de Campo, Petrografía, Mineralogía y Análisis al Soplete, con el fin de suplir en esta labor al profesor Túlio Ospina, Rector de la ENMM, quien se encontraba enfermo y desde su convalecencia las clases en la Escuela sufrieron constantes trastornos, al no encontrar el docente para esos cursos. Scheibe rechazó la oferta, pero aprovechando su viaje programado a Alemania y la presencia en Europa del profesor de la Escuela, Henri Denneve en Bélgica, se les solicitó a ambos, desde la Dirección de la ENMM, la recomendación de un profesor Alemán que viniera a Medellín para encargarse de las cátedras en geología y disciplinas afines, para lo cual recomendaron a un estudiante de la Academia de Minería Real de Berlín, y estudiante de Scheibe en esa Institución, el Ingeniero de Minas Emil Jakob Grosse.

El contrato de Grosse fue asumido por la Empresa del Ferrocarril de Antioquia y la Gobernación del Departamento y tuvo entre sus objetivos: “Por éste contrato el Profesor Grosse se obliga a dictar la clase de Geología de campo y la Escuela a pagar la cantidad de 50 \$ y a facilitar a dicho profesor los laboratorios para ensayos etc. cuando dicho profesor ejecute sus trabajos en ésta ciudad” [4].

A su llegada, Grosse continuó el trabajo definido en la Ordenanza 16 de 1918, que estableció el levantamiento del mapa geológico del Departamento de Antioquia. Sin embargo, la envergadura de la misión encomendada a Grosse no le permitió dictar la clase asignada en la Escuela con la frecuencia esperada [5].

De su labor como maestro muy poco se sabe, debido a su constante ausencia por el trabajo que adelantó en el suroeste antioqueño como reemplazo del profesor Robert Scheibe en la CCN. Estas ocupaciones no permitieron al profesor Grosse ocupar tiempo prudente a su labor en la Escuela Nacional de Minas. Del trabajo docente de Grosse, el historiador David Zuluaga rescató un itinerario de una excursión que presidió el geólogo alemán en noviembre de 1921, al igual que investigó sobre las iniciativas oficiales para el desarrollo de los estudios geológicos en el Departamento de Antioquia, y en especial el estudio de la elaboración del texto de E. Grosse, “Terciario Carbonífero de Antioquia”. La investigación de Zuluaga (2005), además, logró develar “el rostro de uno de los extranjeros que vinieron a Colombia y propiciaron el desarrollo científico del país” [14].

El material de rocas recolectado por Grosse en esta región, y el posterior índice levantado por él como producto de su trabajo de campo e investigación en el terciario carbonífero antioqueño, se conservan actualmente en el Museo de Geociencias de la Facultad de Minas. Una parte de este material, en especial los fósiles vegetales, fueron enviados por el científico, para su estudio, a las universidades de Dresden y Fráncfort en Alemania [8].

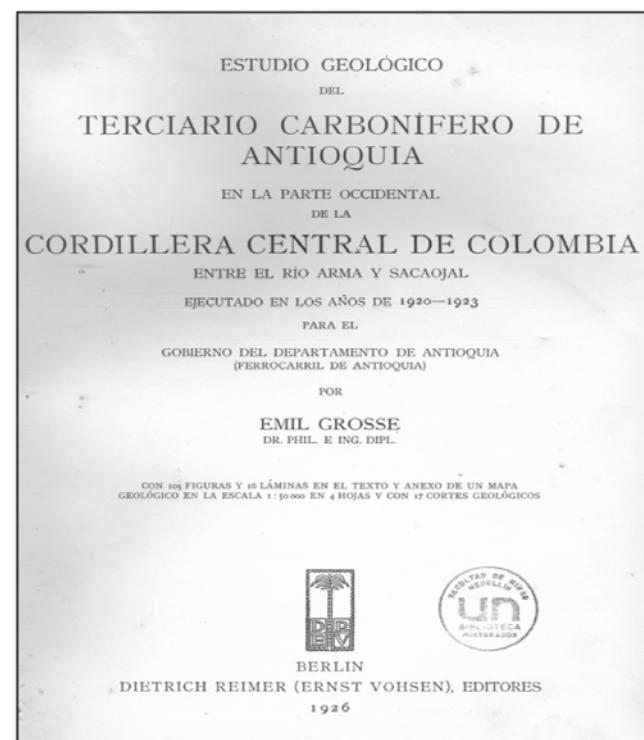


Figura 1. Contraportada del libro Estudio Geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte Occidental de la Cordillera Central de Colombia entre el Río Arma y Sacajal. Fuente: [8].

Asimismo, Grosse realizó también un estudio en geología económica de la región carbonífera del Suroeste del Departamento de Antioquia, del que se benefició el Gobierno Departamental, ya que incluyó un cálculo de reservas destacadas de minerales preciosos de dicha región, que hoy en día se encuentra en permanente actividad minera (Fig. 1.).

Igualmente, el geólogo alemán estuvo vinculado al Ministerio de Industrias por un tiempo aproximado de diez años, entre 1927-1939, en el levantamiento de la geología de los Departamentos de Cauca, Boyacá, Caquetá, Nariño y Cundinamarca. Los informes de sus estudios se pueden consultar en la *Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales* y en el *Boletín de Minas y Petróleos*.

No se ha definido aún porque Grosse no se quedó en la ENMM, tras finalizar el trabajo del *Estudio Geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia*. Puede atribuirse esta decisión a la difícil situación financiera que atravesó por entonces el Departamento de Antioquia y la ENMM, lo cual no le permitió a ésta última asumir el pago pactado con Grosse en la Ordenanza 16 de 1918. De ahí que la Empresa del Ferrocarril de Antioquia asumió este compromiso, como lo confirma el siguiente documento:

“Dígase a la H. Junta Directiva del Ferrocarril de Antioquia que la Escuela de Minas está incapacitada mientras subsista el estado de cosas actual que la ha privado de más del 60 % del auxilio que le ha concedido el Departamento para pagar la parte que le corresponde del sueldo del Sr. Prof. Grosse y pídase a la misma H. Junta que, en cuanto sea posible, disponga que el Ferrocarril pague las mensualidades que debería pagar y que abra a ésta una cuenta donde se carguen estas cantidades, que la escuela podrá reintegrar al ferrocarril en un término prudencial, cuando el Departamento vuelva a pagar a la Escuela el auxilio decretado” [4].

En las actas de la Junta Directiva de la Escuela Nacional de Minas se puede observar que por casi diez años se adelantaron varios intentos e hicieron varias propuestas, a distintos profesores extranjeros, para ocupar el cargo de docente de la cátedra de Geología. Sin embargo, algunas de las propuestas recibidas no llegaron a feliz término, dado que la Escuela no contó con los recursos suficientes para ello.

El rector de la Escuela de esa década, Tulio Ospina, sintió preocupación por la suerte que pudo correr la enseñanza de la geología en la Escuela, como lo indicó el profesor y egresado de la Escuela Alejandro López: “no hubiese quien recogiera con honra y airoso la cátedra”, pues ésta era una ciencia con poco tiempo de enseñanza en nuestro país, con pocos seguidores y con escasos expertos.

El rector de la ENMM, como miembro de la Junta Directiva de ésta Institución y de la Junta del Mapa de Antioquia, justificó también la importancia de contar con un profesor extranjero con experiencia en la enseñanza de la geología. Para él, se hacía necesario “conseguir un profesor en Europa contratándolo por tres años para que viniera a dedicarse exclusivamente al profesorado de la Escuela de Minas y que tal solicitud de profesores se hiciera de preferencia a Bélgica y a Alemania, por las facilidades que

hay de conseguirlos muy competentes y a precios módicos en esos países” [4].

El trabajo en la búsqueda y consecución de apoyo económico para la contratación de este docente fue diligente y recurrió ante varias instancias, como la Gobernación de Antioquia, la Empresa del Ferrocarril y el Ministerio de Instrucción Pública. La necesidad de tener un docente extranjero para esta asignatura, fue manifestada por el Consejo de la ENMM al Ministerio de Instrucción Pública en varias ocasiones, como consta en este oficio que transcribo completo por su importancia:

“La Escuela de Minas tiene necesidad de un profesor extranjero para que se encargue de los cursos de geología práctica o de campo, petrografía y mineralogía y análisis de soplete los cuales sufren trastornos constantes por el cambio de profesor, aunque el personaje ha sido idóneo. Con un profesor permanente y [ilegible] a las nuevas colecciones geológicas nacionales y extranjeras que poseemos, podría convertir ésta sección de la enseñanza en un verdadero Instituto Geológico, con gran provecho para la nación, que tanto necesita los geólogos especialistas. En consecuencia, si su ministerio puede contratar al profesor Oscar Erich Meyer y disponer de los fondos para pagarlo hará Ud. gran servicio a este Instituto que carece de los fondos para lo último y crearía una de las instituciones más necesarias en un país rico en minas de todos los metales en yacimientos de petróleo y otros minerales útiles” [4].

4. Los docentes no extranjeros y el reto de enseñar Geología (1911-1930)

Antes de la llegada de Grosse a la ENMM, la enseñanza de la asignatura de Geología estuvo a cargo de los profesores Tulio Ospina (1911-1920), Carlos Gutiérrez (1920-1921), Juan de la Cruz Posada (1921-1933?), y Luis Felipe Osorio (1914-1921) quien fue estudiante de los dos primeros profesores.

Debido a la inestabilidad laboral, los compromisos que algunos de ellos tuvieron con otras empresas y el bajo sueldo que ofreció la Escuela, no pudieron dedicarse exclusivamente a la función de la enseñanza de la geología y tuvieron que sortearla con trabajos particulares, en detrimento de aquella. Sin embargo, la labor realizada por los docentes nombrados ayudó a la ampliación del conocimiento geológico del territorio antioqueño, durante las primeras décadas del siglo XX, a su vez que impulsó la enseñanza de la geología a nivel profesional, y con ella el levantamiento de cartas geológicas de Antioquia y de Colombia.

Esta práctica se adelantó en la asignatura de Geología Práctica, cuyo objetivo inicial fue llevar a cabo “las anotaciones geológicas de campo y la formación de mapas geológicos” [4].

Esta materia se cursó inicialmente durante el quinto año de Ingeniería de Minas (no se dictó para Ingeniería Civil), se dictó una vez cada 15 días y estuvo vigente desde el año 1915 en el pensum de la Escuela.

En este sentido, se puede resaltar que la Junta Directiva de la ENMM organizó un pensum académico con un alto componente de enseñanza aplicada, práctica, como lo describe la siguiente cita:

“En la formación del nuevo Pensum, lo mismo que en la elaboración de los Estatutos vigentes, se ha dado a la Escuela una orientación enteramente moderna, especializando en clases separadas ramos que antes estaban comprendidos en los cursos generales de Física, Química, Mecánica y Geología, como los de Electrotecnia, Termodinámica, Locomotoras, Hidromecánica y Aire Comprimido, Química Industrial, Análisis Cuantitativo, Petrografía, Geología Practica (levantamiento de mapas geológicos). Talleres Mecánicos y Práctica en el Laboratorio de Metalurgia” [4].

Para cumplir con este objetivo se diseñaron excursiones a diferentes lugares del Departamento, según la asignatura. Asimismo, se creó un plan de consecución de recursos para la conformación de los laboratorios, adquisición de equipos y suministros necesarios para dar cumplimiento a la orientación de cada una de las asignaturas que se impartieron, como también para el buen desarrollo de las mismas, con el objetivo principal de contar con los materiales y espacios adecuados para aprender la parte práctica de dichas materias. En los informes enviados al Ministerio de Instrucción Pública se relacionaban así:

“(...) La enseñanza ha venido haciendo más y más práctica todos los días. El ejercicio en los laboratorios de química general y analítica y de ensayos es casi constante. Los estudiantes de Talleres mecánicos pasan dos de los sábados de cada mes en práctica continua en los talleres de la Escuela de Artes y Maquinaria; los de Geología de campo emplean igual número de días en ejercicios sobre el terreno y han alcanzado a levantar en el presente año escolar el plano geológico del Municipio de Medellín. Además, en el año corrido desde mi último informe al Sr. Ministro de Instrucción Pública se han llevado a cabo las siguientes excursiones, yendo los alumnos a pie y dirigidos por uno de los Profesores: de Geología, bajo la dirección del suscrito Rector, a la ciudad de Antioquia; de Explotación de minas y Metalurgia, bajo la dirección del Profesor Dr. Juan de la C. Posada, a las minas de Zancudo, Otramina y la Ferrería de Amagá; de Química industrial, a Caldas e Itagüí, bajo la dirección del Profesor D. Enrique Ehrenspurger; de Metalurgia, primer curso, a Zancudo, Otramina, Amagá, Armenia y Heliconia, a cargo del Profesor Dr. Fernando Escobar; de Metalurgia, segundo curso, a Santa Rosa de Osos, bajo la dirección del Profesor D. Enrique Ehrenspurger; otra bajo la dirección de este mismo Profesor, de la Clase de Metalurgia y de la de Explotación de minas, primer curso, a Zancudo, Otramina y la Ferrería de Amagá; de la Clase de Construcciones civiles, a Puerto Berrío, con el Profesor D. Horacio Rodríguez; y de la Clase de

Maquinaria, a Envigado, con el Profesor D. Pablo Brunet” [4].

Los pioneros de la enseñanza de la geología en la ENMM hicieron énfasis, dentro de la metodología implementada, en la importancia de las salidas de campo para la práctica científica de la geología y clara para la educación integral que ellos impartieron a los estudiantes. La investigación en los archivos ha develado que éstas actividades eran planeadas y orientadas en pro de la aprehensión de los conceptos aprendidos en el aula, y que se alcanzaron a partir de la observación, descripción y análisis logrados en el campo.

4.1. Tilio Ospina Vásquez pionero de la enseñanza de la Geología en Antioquia

La metodología inicial de enseñanza de la geología aplicada por Ospina, correspondió a la aprendida por él en la Escuela de Minas de Berkeley, Estados Unidos, junto a su maestro el profesor James Le Conte, fundamentada principalmente en el trabajo de campo y la práctica. En las salidas de campo, el profesor Ospina enseñó a los estudiantes la importancia de la observación rigurosa como base fundamental de las posibles hipótesis, que dieron respuesta a los interrogantes propios en el campo, tales como la composición y formación de las rocas y los yacimientos geológicos. En el ámbito práctico de la enseñanza de la geología, Ospina llevó a sus estudiantes a excursiones científicas a los distritos mineros del suroeste antioqueño y a las empresas dedicadas a la extracción de minerales y la metalurgia, como lo fueron La Sociedad del Zancudo y la Ferrería de Amagá. En una carta remitida al Ministerio de Instrucción Pública se nombran algunas de ellas:

“Medellín al Zancudo 150 Km.

Medellín a Jericó por Titiribí y el Zancudo 150 Km.

Medellín a Cerro de Tusa.

Medellín a la Ferrería de Amagá.

En cada salida se visitan los montajes de las empresas:

En el Zancudo: Bocartes para trituración, cajas de contracción y mesas Wilfley, Frue Vanner y Alemanas u oscilantes para la separación de los sulfuros de calcinación y de fundición para la producción de mates inst. para la cianuración sulfatación y sulfuración” [4].

Durante una salida de campo con el profesor Ospina, el estudiante Alejandro López, quien fue luego profesor de la Escuela, recordó de ésta:

“Al recorrer el territorio patrio, ya en correrías profesionales, ya en aventuras militares iba llenando el alforjón de apuntes, datos, dibujos de cortes geológicos y muchas de esas cosas que nadie recoge mientras va a horcajadas en una mula por nuestros andurriales, como piedras, de esas que la gente mira recoger con tamaños ojos abiertos, no siendo ricas en oro o cosa que no valga; pues esto de preferir llenar la alforja de traquitas, granitos y sedimentos calcáreos en lugar de apearse de buen regatón o bucólica, solo

es dado verlo en quijotes científicos, entre los cuales tendría que figurar el Sr Ospina de primero” [10].

En las palabras de Alejandro López se resume el trabajo propio de un geólogo en campo y la atención que debe prestarse al recorrido de la excusión, puesto que para entonces la labor partía casi de cero, ya que el conocimiento geológico en algunos lugares era nulo y en otros había sido explorado por compañías mineras, motivo por el cual el uso de la información era reservada.

Por otra parte, Túlio Ospina publicó varias obras que dieron cuenta de distintos ámbitos de la geología del país y de Antioquia, entre estas *La Quiebra del Nus* (1887), *Reseña sobre la Geología de Colombia y especialmente del antiguo Departamento de Antioquia* (1911), *Mapa Geológico sintético de Colombia* (c.a.1915), y *Clasificación megascópica de las rocas* (1919). Sus trabajos permitieron mostrar la distribución estratigráfica de las formaciones geológicas del departamento, pues era consciente que no podía proponer aún la clasificación cronológica de las mismas, porque no contaba con la información suficiente para hacerlo, como lo describe en la siguiente cita:

“Es un estudio sumario sobre las formaciones geológicas, que no entra en detalles en describir los elementos estratigráficos de cada terreno, se limita a una relación sumaria de las principales rocas que los constituyen [...] tampoco divide en grandes eras geológicas pues dicha clasificación habría de fundarse con más frecuencia en la posición relativa de los estratos, en sus caracteres líticos, y en su continuación por países vecinos donde el metamorfismo no ha destruido las huellas de los organismos característicos en la determinación de los fósiles” [10].

4.2. Juan de la Cruz Posada: Eslabón entre industria y academia

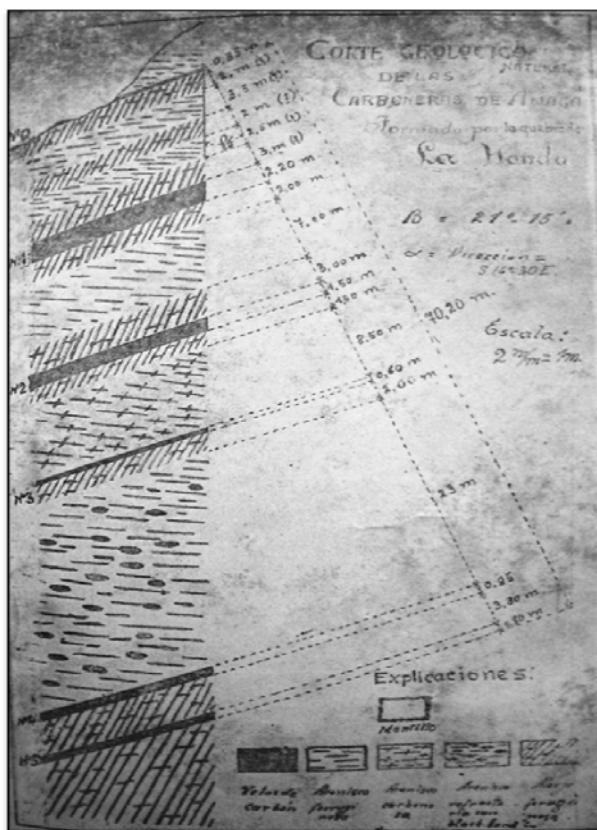
Otro profesor que trabajó en el área de la geología fue Juan de la Cruz Posada (1869-1961), quien realizó con los estudiantes de la Escuela salidas frecuentes de campo, principalmente a las zonas de Amagá y Titiribí, para enseñar de manera práctica el reconocimiento en campo de los depósitos de carbón localizados en las rocas del Terciario carbonífero de Antioquia, y de oro y plata alojados en los pórpidos de la zona de la Mina de El Zancudo. A su vez, aprovechó para enseñarles la parte práctica de las asignaturas de Metalurgia y Explotación de Minas, asignaturas que también tenía a su cargo.

Uno de los informes que entregaron los estudiantes, tras esta salida, quedó registrado en el periódico de los Anales de la Escuela Nacional de Minas, en éste además del itinerario de campo quedaron registrados perfiles geológicos, trazados, al aprovechar que “en grandes avenidas recientes, el lecho de la quebrada de La Honda fue erosionado, hasta dejar visible porción considerable del terreno carbonífero” [1]. Allí dibujaron la sección que se presenta a continuación (Imagen 2) y tomaron directamente los datos del terreno, para preparar un corte geológico, acompañado de una leyenda con la descripción litológica y los dibujos de algunos de los fósiles propios de esta formación (Figs. 2 y 3).

Finalmente, Posada publicó un trabajo sobre la geología del Departamento de Antioquia, donde describió los rasgos fisiográficos, litológicos, petrográficos, las edades de los grupos de rocas, un perfil y un croquis geológico, actualizados con lo conocido hasta entonces en el país. También publicó dos mapas geológicos uno de Antioquia (1936) y otro de Colombia (1928) [11].

Hizo un llamado a sistematizar la información geológica y a incluir los trabajos realizados sobre la geología colombiana en los primeros 30 años del siglo XX, con el fin de terminar y completar la carta geológica, pues aunque se llevaron a cabo varios intentos de índole estatal para llevar a cabo esta acción, hasta el momento no había sido posible terminarla [11].

De igual forma, invitó a los geólogos extranjeros que se encontraban en el país contratados por el gobierno nacional en diferentes lugares, para que ayudaran en el estudio y definición de las formaciones geológicas pre-cenozoicas, que hasta entonces no se habían estudiado con detalle, lo cual provocó especulaciones e inexactitudes con respecto a la formación y edad de las rocas que se encontraban por encima o por debajo de éstas, como lo explica el profesor Posada en esta cita. “[...] entre tanto la situación del problema seguirá, quien sabe hasta cuándo por el mismo camino. Formar la carta geológica de un país y publicar la monografía correspondiente es tarea larga, ardua y costosa, pues se requiere el levantamiento previo del mapa geodésico a curvas de nivel y esta obra aún no se ha emprendido en forma” [11].



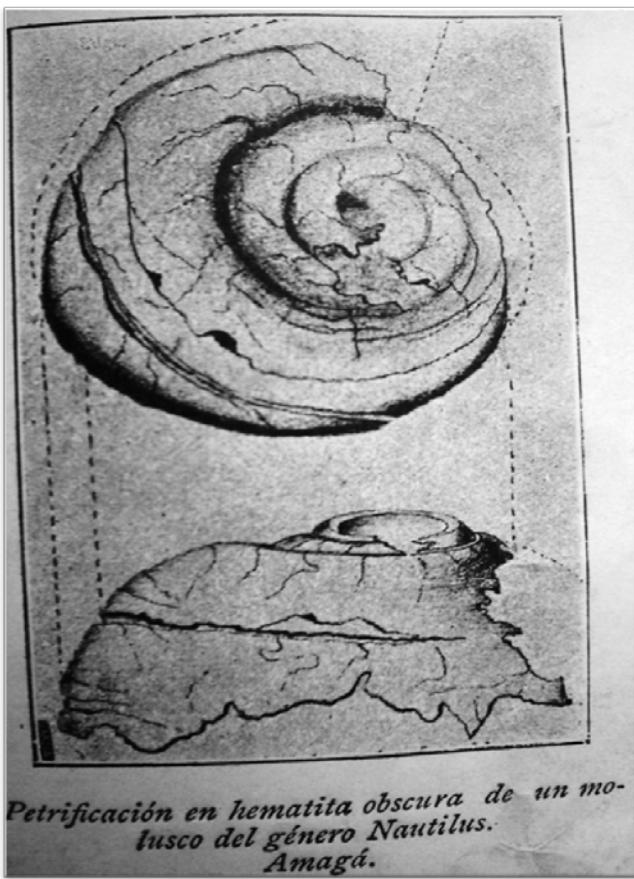


Figura 3. Petrificación en hematita obscura de un molusco del género *Nautilus*. Amagá.

Fuente: [1].

4.3. Luis Felipe Osorio: El profesor de Geología

Otro de los docentes de esta asignatura y de quien poco se ha hablado en otras publicaciones sobre ésta temática, fue Luis Felipe Osorio quien además de haber desempeñado su labor como gerente Administrador del Ferrocarril de Girardot en 1912, colaboró en la Escuela en varias actividades, entre las cuales se encontraron las siguientes: acompañamiento y realización de salidas técnicas programadas por las directivas de la Escuela a los estudiantes de Ingeniería Civil, en particular una realizada al Departamento de Cundinamarca en el año de 1916 y en compañía de los también profesores de la Escuela, Horacio Rodríguez y Carlos Gártner; dirección de las asignaturas de Explotación de Minas, Mineralogía, Geología General, Agrimensura, Análisis al Soplete y Vías de Comunicación y finalmente la continuación del registro e inventario de las muestras del Gabinete de Mineralogía, en especial la de minerales y rocas.

Igualmente dictó en ocasiones la asignatura de Geología, generalmente como reemplazo de los profesores Túlio Ospina, Mariano Ospina Pérez, Juan de la Cruz Posada y Emil Grosse, cuando alguno de ellos debió ausentarse de la Escuela por sus compromisos laborales. Acerca de la labor del profesor Osorio como docente de ésta Institución se

conoce poco, sin embargo, se pudieron hallar registros suyos como estudiante de la Escuela Nacional de Minas durante los años 1904-1911, al igual que como docente entre los años 1915-1923. Grosse lo nombró, junto con otros profesores de la ENMM, en el prefacio de su obra del *Terciario carbonífero* a quienes agradece por haberlo acompañado a las carboneras de Amagá y por facilitarle los planos y la información que tenían de esta región.

5. El alemán Robert Wokittel y la clase de Geología

El esperado profesor alemán que se encargó de la clase de Geología en la ENMM, fue el geólogo Robert Wokittel (1886-1970), quien estuvo vinculado a la Escuela Nacional de Minas de Medellín por 11 años, desde 1926 hasta 1937. Una vez finalizó sus actividades con esta institución se dedicó a realizar estudios sobre geología económica en el territorio colombiano por casi 45 años; trabajos que realizó para diferentes instituciones del Estado.

Su trabajo, durante los once años de docencia en la Escuela, se enfocó inicialmente en el cuidado y mejoramiento de los Laboratorios de Geología, Mineralogía, Hidrocarburos y Beneficio de Minerales, al mismo tiempo que en la docencia de las asignaturas de Mineralogía II, Mineralogía Microscópica, Geología I, Geología II, Explotación de Minas, Beneficio de Minerales, Geología Práctica e Hidrocarburos I y II.

Como apoyo a sus clases de Geología, Wokittel elaboró un manuscrito en el que explicó cómo determinar la estratigrafía y la geología histórica (referida a la geocronología) de una región, a partir de tres métodos: petrográfico, importante para conocer las condiciones de depósito de las rocas; paleontológico, que ayuda a determinar la edad geológica de los estratos, la vida que habitó y el clima que dominó sobre la tierra en diferentes épocas; y el de facies, que comprende las características petrográficas y paleontológicas de los estratos, al conocer por los fósiles la edad y por los caracteres paleontológico y petrográfico las condiciones locales de depósito. De igual forma, Wokittel indicó la manera de presentar la nomenclatura geológica, según la división estratigráfica o cronológica de los estratos [13].

Al igual que sus colegas y siguiendo la norma de la ENMM, Wokittel organizó varias salidas de campo o excursiones para la asignatura de Geología General, a diferentes regiones del país y fuera de él, entre las cuales se encontraron: Chocó, Norte de Santander, Venezuela y la Cordillera Oriental (donde se visitaron el Altiplano Cundiboyacense, las minas de sal de Nemocón y Zipaquirá, los termales de Paipa, la Empresa Siderúrgica de Paz del Río, entre otros). Algunos informes de éstas salidas se publicaron en la Revista *Dyna* y en los *Anales de la Escuela Nacional de Minas*. (Fig. 4)

En la actualidad, en el Museo de Geociencias se conserva un archivo fotográfico de algunas de estas salidas, donado por la señora Helena Garcés de Pérez en el año 2014, hija del Doctor Hernán Garcés González, primer Doctor en Geología del país y estudiante del profesor Wokittel durante la década de 1930.

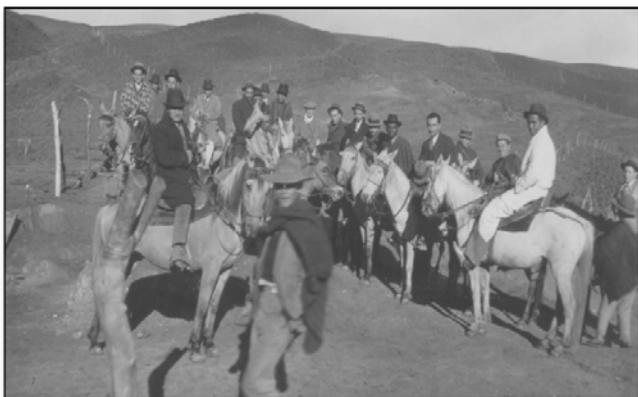


Figura 4. Excursión al oriente del país, hecha en 1935 por el grupo de egresados de ese año, bajo la dirección del profesor Roberto Wokittel en Cuestaboba, Páramo de Santurban, entre Mutiscua y Bucaramanga.

Fuente: [3].



Figura 5. Tren del Ferrocarril Cúcuta-Villamizar pasando frente a la Catedral de Cúcuta. Máquinas de leña.

Fuente: [3].

Para ésta época, el plan de estudios de la Escuela contó con cuatro asignaturas de geología, a saber: Geología I (General y Dinámica), Geología II, Geología Económica y Geología Práctica, las cuales se dictaron a partir del tercer semestre de estudios. En esta misma década, se creó un programa de la asignatura más elaborado, que presentó a la geología de esta forma:

“Esta clase, que es una recapitulación de todos los conocimientos adquiridos en las clases anteriores de minería y geología, se dicta sólo en el aula solamente en los que sea necesario para los trabajos de campo. El objetivo principal es la práctica en Geología. Se levantan prácticamente mapas geológicos de las cercanías de Medellín, recogiendo colecciones que presenta la región” [4].

Las nuevas asignaturas mejoraban en buena parte la concepción que en esta región y especialmente en los estudiantes se tenía sobre la geología, esto puede identificarse en que los trabajos de tesis aumentaron en esta área del conocimiento. Se incluyeron estudios de geología aplicada

para investigaciones en yacimientos minerales, paleontología, trazado de túneles, tratados sobre Geología y minería, legislación minera y agrimensura entre otras [6].

Esta oferta de asignaturas abrió también la posibilidad de conocer y entender los fenómenos y procesos geológicos, a partir de la teoría, la observación directa y la experimentación; favoreciendo el desarrollo y la modernización de ésta área del conocimiento.

Los cambios en el pensum respondieron a las necesidades que se tuvieron para el conocimiento geológico del territorio y para tal fin, la Escuela adquirió bibliografía especializada y equipos de laboratorio, al igual que se realizaron salidas de campo, que constituyeron estrategias para el aprendizaje y la aplicación de la geología en la vida práctica del ingeniero.

6. Conclusiones

Las fuentes consultadas para la elaboración de este artículo permiten interpretar que a pesar de las dificultades afrontadas por los directivos de la Escuela durante la época de estudio, se logró desarrollar, en esta institución, una investigación continua en el conocimiento de la geología de la región a partir del fortalecimiento de tres ámbitos principalmente: las publicaciones, los intercambios internacionales (las relaciones con docentes extranjeros), y la investigación geológica aplicada que se implementó al interior de este Centro Educativo. Permiten también mostrar el proceso de fortalecimiento de la enseñanza de la Geología en la Escuela Nacional de Minas de Medellín, a principios del siglo XX, a partir de una reflexión histórica sobre la formación profesional y las prácticas educativas implementadas en esta Institución.

Tulio Ospina proyectó nuevos rumbos para la disciplina geológica toda vez que adelantó una actualización del pensum que buscaba una formación competente para los ingenieros, capaz de contribuir al conocimiento de los recursos de la región y del país a partir de la práctica técnico científico aprendida en las aulas y en el campo.

Este centro educativo no solo enseñó la geología desde la teoría, sino que además se llevó a la práctica tanto por parte de los profesores como de los estudiantes, lo cual generó en ellos inquietudes e interrogantes por resolver, especialmente intereses por conocer la geología de varios sitios de interés minero, así como también en el orden cronológico, composición y origen de las formaciones geológicas de Antioquia. Los ingenieros interesados en el conocimiento y estudio de la geología fueron formados siguiendo una tradición académica, en la que se procuró contar con los recursos (humanos y físicos), que contribuyeron a darle un énfasis práctico a la enseñanza de la geología.

A pesar de que la Escuela Nacional de Minas de Medellín, durante la temporalidad estudiada, no contó dentro de sus programas académicos con una carrera de Geología, si contribuyó a mejorar el conocimiento de la estructura de esta disciplina, permitiendo a los profesores y alumnos de esta institución producir nuevo conocimiento, que hoy podemos consultar en informes de campo, artículos, libros, colecciones y tesis.

Por último, se resalta la memoria científica que salvaguarda la Universidad y que nos proporcionó la posibilidad de pensar el pasado en especial los intereses, relaciones y proyectos que adelantó la Escuela Nacional de Minas de Medellín por el avance en la enseñanza, estudio y conocimiento de la geología de Antioquia y de Colombia.

Referencias

- [1] Acebedo, F. y Ángel, J.E., Corte geológico natural de las carboneras de Amagá. Formado por la Quebrada la Honda. Dibujo. Anales de la Escuela Nacional de Minas, 5, pp. 286-288, 1913.
- [2] Acosta, J., Viajes científicos a los Andes Ecuatoriales ó Colección de memorias sobre física, química e historia natural de la Nueva Granada, Ecuador y Venezuela. París: Librería Castellana, 1897.
- [3] Archivo Central Museo de Geociencias, Facultad de Minas (ACMGFM), Medellín-Colombia. Fondo Doctor Hernán Garcés González.
- [4] Archivo Central Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (ACUNCM), Medellín-Colombia. Fondo Escuela Nacional de Minas.
- [5] Archivo Histórico de Antioquia (AHA), Medellín-Colombia. Fondo Ferrocarril de Antioquia.
- [6] Castro, P. y Hermelín, M., Breve historia de la cartografía geológica en el departamento de Antioquia, Colombia. Revista Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 27(103), pp. 245-261, 2003.
- [7] De Mendonça Figueirôa, S.F., História e filosofia das geociências: Relevância para o ensino e formação profissional. Terra Didática, 1(5), pp. 63-71, 2009.
- [8] Grossé, E.J., Terciario carbonífero en Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia. Berlín: Dietrich Reimer Editores, 1926.
- [9] Kuhn, T., La estructura de las revoluciones científicas. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica, 2004.
- [10] Ospina-Vásquez, T. y López, A., Reseña de la geología de Antioquia. Medellín: Asociación Colombiana de Mineros, 1939.
- [11] Posada, J. de la C., Bosquejo geológico de Antioquia. Anales de la Escuela Nacional de Minas, 38, pp. 1-50, 1936.
- [12] Scheibe, R., Copia del informe sobre los resultados del trabajo de la Comisión Científica en Antioquia rendido al Ministerio de Obras Públicas por el jefe de ella Doctor Robert Scheibe. Bogotá: Imprenta Nacional, 1919.
- [13] Wokittel, R., Conferencias de Geología Histórica, Geología de Colombia. Medellín: Escuela Nacional de Minas de Medellín, 1926.
- [14] Zuluaga, D. et al., El Dr. Emil Grossé y la elaboración de un texto geológico en Antioquia, en Memorias del X Congreso Colombiano de Geología, Bogotá, Gente Nueva Ltda, 2005, pp. 8-11.

Y.J. Rodríguez-Vega, es Ing. Geólogo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, MSc. en Historia y Candidata a Doctora en Ciencias Humanas y Sociales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Actualmente se desempeña como docente ocasional y Secretaría Académica en la misma facultad.
ORCID: 0000-0003-0529-2180

Y.A. Chicangana-Bayona, es Historiador de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá, MSc. y Dr. en Historia de la Universidad Federal Fluminense, Brasil. Profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Actualmente se desempeña como Decano de la Facultad de Ciencias Humanas y Económicas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y es Coordinador del Grupo de Investigación Historia, Trabajo, Sociedad y Cultura, perteneciente a la misma Facultad.
ORCID: 0000-0002-0743-0228

Permeability and porosity changes in unconsolidated porous media due to variations of confining stress and temperature - An experimental study

Guillermo Alzate-Espinosa ^a, Juan Alejandro Arias-Buitrago ^b, Cristhian Bernardo Morales-Monsalve ^a, Alejandra Arbelaez-Londoño ^a, Abel Naranjo-Agudelo ^a, Rick Chalaturnyk ^b & Gonzalo Zambrano ^b

^a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, gaalzate@unal.edu.co, cbmoralesm@unal.edu.co, aarbelal@unal.edu.co, anaranjo@unal.edu.co

^b Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, ariasbui@ualberta.ca, rjchalaturnyk@ualberta.ca, gonzalo@ualberta.ca

Received: June 06th, 2017. Received in revised form: July 05rd, 2017. Accepted: July 17th, 2017.

Abstract

Thermal recovery processes are an efficient and commonly accepted technique for the exploitation of heavy oil reservoirs. The increase in the temperature of the porous medium because of steam injection in a thermal recovery processes, significantly reduces the oil viscosity and makes possible its flow to the producing wells. In recent years, there have been technological advances that have allowed such operations to be monitored achieving more profitable and safe process from the perspective of the integrity of the surface flow system. The assurance of the formation flow capacity as well as the mechanical integrity of the production and overlying formations with pressure and temperature changes caused by the steam injection process is a subject of current validity, given their implications economic and environmental impacts, especially for heavy oil reservoirs at shallow depths. Therefore, to ensure a correct understanding of what happens to reservoir and overlying formations during the thermal recovery process has become an issue of interest in reducing the environmental impact of these operations and generating models that predict production and the recovery with accuracy and reliability.

Experimental evidence suggests that the productivity of the wells and the flow capacity of the reservoir affected by thermal recovery processes depend not only on the temperature effect on the heavy oil viscosity but also on the effect of temperature on both petrophysical and mechanical properties of the porous medium. Therefore, the understanding of the geomechanical and petrophysical behavior of the geological formations under different stress and temperature scenarios is fundamental to model the different processes within the reservoir during the thermal recovery, and in particular those that determine the productivity of the wells and the recovery factor of the process.

The paper presents laboratory results about the porosity and permeability behavior with temperature and confinement stress for a non-consolidated porous medium. The evaluation makes use of reconstituted cores made from unconsolidated outcrops completely saturated with heavy oil. At each confinement stress condition, pore volume, total volume and permeability of the core are recorded at different heating stages. The results show a significant dependence of the permeability and porosity with the confinement stress. The greater the effective confinement stress, the greater the reduction of porosity and permeability as temperature increases. At low confinement stress, the tendency is maintained for permeability but not for the porosity of the porous medium.

Keywords: Thermal recovery; thermo-mechanical effect; permeability; porosity; heavy oil.

Cambios en la permeabilidad y porosidad de medios porosos no consolidados debido a cambios en el esfuerzo de confinamiento y la temperatura - Un estudio experimental

Resumen

Los procesos de recobro térmico se constituyen en una técnica eficiente y comúnmente aceptada para la explotación de los yacimientos de crudo pesado. El aumento de la temperatura del medio poroso como resultado de la inyección de vapor en los procesos de recobro térmico,

How to cite: Alzate-Espinosa, G., Arias-Buitrago, J.A., Morales-Monsalve, C.B., Arbelaez-Londoño, A., Naranjo-Agudelo, A., Chalaturnyk, R. and Zambrano G., Cambios en la permeabilidad y porosidad de medios porosos no consolidados debido a cambios en el esfuerzo de confinamiento y la temperatura - Un estudio experimental. Boletín de Ciencias de la Tierra, 42, pp. 64-72, Julio, 2017.

reduce en forma significativa la viscosidad del petróleo y hace posible el flujo del mismo hacia los pozos productores. En los últimos años, se han presentado avances tecnológicos que han permitido que tales operaciones estén monitoreadas y que la operación sea más rentable y segura, desde la perspectiva de aseguramiento de la integridad del sistema de flujo en superficie. El aseguramiento de la capacidad de flujo de la formación al igual que la integridad mecánica de la formación productora y las formaciones suprayacentes con los cambios en presión y temperatura promovidos por el proceso de inyección de vapor, es un tema de actual vigencia, dadas sus implicaciones económicas y medioambientales, en especial para yacimientos de crudo pesado a profundidades someras. Por lo tanto, procurar la comprensión correcta de lo que sucede en el yacimiento y las formaciones suprayacentes durante el recobro térmico se ha convertido en un tema de interés para reducir el impacto ambiental de estas operaciones y generar modelos que predicen la producción y el factor de recobro con precisión y fiabilidad.

Evidencias experimentales plantean que la productividad y la capacidad de flujo de los pozos afectados por procesos de recobro térmico no sólo dependen del efecto de la temperatura sobre la viscosidad del petróleo pesado, sino que también involucran el efecto de la temperatura sobre las propiedades tanto petrofísicas como mecánicas del medio poroso. Por lo tanto, la comprensión del comportamiento geomecánico y petrofísico de las formaciones geológicas bajo diferentes escenarios de esfuerzos y temperatura es fundamental para modelar los diferentes procesos al interior del yacimiento durante el recobro térmico, y en particular los que determinan la productividad de los pozos y el factor de recobro del proceso.

El artículo presenta los resultados de laboratorio acerca del comportamiento de la porosidad y la permeabilidad con la temperatura y el esfuerzo de confinamiento en un medio poroso no consolidado. La evaluación hace uso de núcleos reconstituidos a partir de muestras de formación no consolidadas saturadas con petróleo pesado. Para cada condición de esfuerzo de confinamiento, se realizó el registro del cambio con temperatura del volumen poroso, el volumen total y la permeabilidad de la muestra a diferentes etapas de calentamiento. Los resultados evidencian una dependencia significativa de la permeabilidad y porosidad con el esfuerzo de confinamiento al que se somete el medio poroso. A mayor esfuerzo efectivo de confinamiento, mayor es la reducción de la porosidad y permeabilidad al aumentar la temperatura; mientras que a bajo esfuerzo de confinamiento, se mantiene la tendencia para la permeabilidad pero no para la porosidad del medio poroso.

Palabras Clave: Recobro térmico; efecto termo-mecánico; permeabilidad; porosidad; crudos pesados.

1. Introducción

El efecto de la temperatura en las propiedades de los medios porosos ha capturado la atención de los científicos que trabajan en diferentes áreas, tales como ingeniería de perforación, ingeniería de yacimientos y recobro de petróleo por métodos térmicos, como también en proyectos de energía geotérmica y eliminación de desechos nucleares. [1] presentan una recopilación de la información disponible hasta el momento de su publicación sobre los cambios en propiedades petrofísicas causados por cambios de temperatura. Se discuten propiedades tales como porosidad, permeabilidad, resistividad eléctrica y presión capilar. Los autores plantean la presencia de similitudes y contradicciones entre los diferentes trabajos revisados. Con base en la revisión presentada en este artículo, se encuentra que las propiedades petrofísicas pueden cambiar considerablemente por cambios de temperatura hasta los 400°C, por lo que recomiendan tomar en cuenta estos cambios en la evaluación de la formación y en los cálculos de ingeniería de yacimiento al igual que en la evaluación de la productividad asociada a procesos térmicos de recobro de petróleo en yacimientos de crudo pesado.

Las contradicciones presentadas en este trabajo están asociadas al no consenso acerca de la tendencia de variación de la permeabilidad del medio debido a cambios de temperatura. Mientras que algunos autores han encontrado que la permeabilidad disminuye con la temperatura, algunos otros han propuesto el comportamiento opuesto. Incluso algunos autores han encontrado que el incremento de la temperatura es una causa del daño de formación [2]. También se han realizado algunos estudios para encontrar el efecto del enfriamiento de la formación durante la circulación del fluido

de perforación en las operaciones de perforación de pozos [3–5].

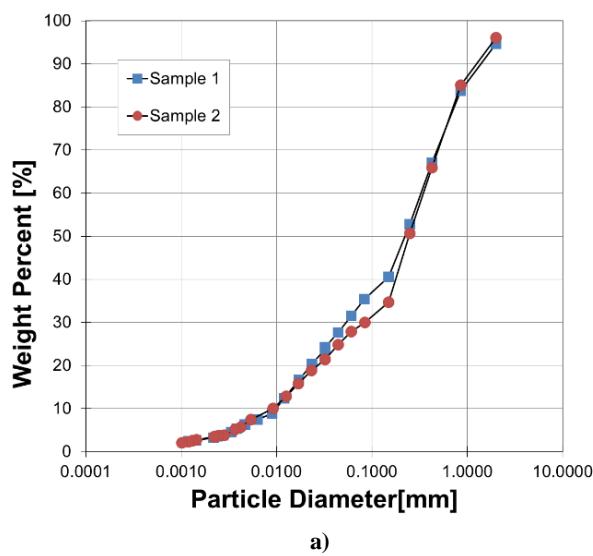
El efecto de la temperatura se ha evaluado para diferentes litologías como carbonatos [6], donde se realizan pruebas de permeabilidad a diferentes condiciones de temperatura y esfuerzo de confinamiento. Los resultados muestran una reducción de la permeabilidad cuando la temperatura aumenta para todos los casos, y se enfatiza en que la pérdida de permeabilidad es más significativa cuando la muestra se somete a mayores esfuerzos de confinamiento, con una reducción máxima de permeabilidad del 65%.

Por su parte Yu *et al.* (2015) [7] evalúan el efecto de la temperatura y el esfuerzo de confinamiento en el comportamiento de la permeabilidad en muestras de arenisca. Inicialmente se evidencia una disminución de la permeabilidad con la temperatura hasta los 200°C, esta reducción es más evidente para los casos de menor confinamiento, a partir de los 200°C la permeabilidad aumenta con la temperatura para todos los estados de confinamientos.

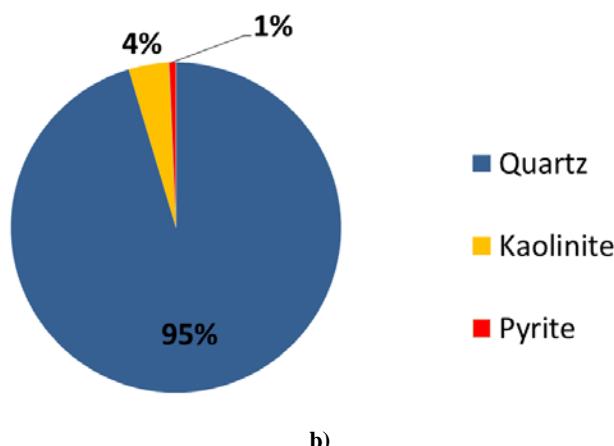
Una vez que la recuperación térmica se tornó en una práctica común para aumentar el factor de recobro de petróleo en yacimientos de crudo pesado y de arenas bituminosas en Canadá, algunos investigadores promovieron estudios e investigaciones encaminados a evaluar el cambio de las propiedades petrofísicas durante estos procesos. Scott *et al.* (1994) [8] presentan un estudio de la deformación volumétrica y los cambios de permeabilidad durante la inyección de vapor. Los autores concluyen que el cambio en la permeabilidad con la temperatura es altamente influenciado por las condiciones de confinamiento que se tengan durante las pruebas. Así pues, para casos de alto confinamiento, la permeabilidad del medio disminuye,

mientras que en casos de bajo confinamiento, la permeabilidad aumenta con los cambios de temperatura. Chalaturnyk (1995) [9] verifica el comportamiento dilatante de arenas no consolidadas cuando la temperatura aumenta, y dicho proceso resulta en un aumento hasta del 30% en la permeabilidad.

Un menor número de estudios se reportan encaminados a evaluar y determinar la influencia del cambio de la temperatura en la porosidad de los medios porosos. Algunos de estos estudios se han enfocado en encontrar la relación entre temperatura y porosidad utilizando modelos analíticos [10,11]. El trabajo de Tran *et al.* (2008) [10] hace uso de la teoría poro-elástica para obtener una expresión analítica que relaciona los cambios en la porosidad con los cambios en temperatura. Adicionalmente, Hassanzadegan *et al.* (2014) [11] concluyen que la porosidad es directamente proporcional a la temperatura para bajos estados de confinamiento, mientras que a estados de altos esfuerzos, la porosidad disminuye con la temperatura.



a)



b)

Figura 1. Características de la formación Picacho a) Distribución de partícula de la arena b) Composición mineralógica.

Fuente: Los Autores.

Con el fin de comprender el comportamiento de las propiedades petrofísicas (porosidad y permeabilidad) en formaciones de crudo pesado colombianas durante los procesos de recobro térmico, se plantea una serie de pruebas experimentales que incluyan las mediciones de estas propiedades a diferentes condiciones de temperatura y esfuerzo de confinamiento. Para este estudio, se utilizan núcleos reconstituidos a partir de material recolectado en un afloramiento de la formación Picacho, formación portadora de crudo pesado y de posible interés de desarrollo comercial en Colombia. El análisis mineralógico de las muestras refleja la presencia de una cantidad importante de finos, aproximadamente 40%, en una matriz constituida principalmente por cuarzo. La Fig. 1 muestra la distribución del tamaño de partícula y la composición mineralógica de la formación Picacho.

2. Montaje experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en el laboratorio GeoREF de la Universidad de Alberta. Se utilizó una celda triaxial de alta presión y alta temperatura. La celda se coloca en una cámara ambiental donde la temperatura puede ser controlada como se muestra en la Fig. 2. La parte superior de la celda es flotante, lo que permite aplicar una presión de confinamiento isótropa alrededor de la muestra. El fluido utilizado para saturar la muestra es salmuera (NaCl al 3%) y la presión de poro se mantiene constante para todos los ensayos e igual a 800 psi. El nivel de presión de poro sugerido se plantea con dos propósitos, en primer lugar para asegurar que el fluido alojado en el poro se mantenga en estado líquido a la condición de temperatura más alta a utilizar en las pruebas (230°C), y en segundo lugar, es una estimación de la presión de poro en yacimientos de hidrocarburos a condición de gradiente normal de presión y a una profundidad aproximada de 2000 pies. Se utiliza aceite de silicona como fluido de confinamiento dado que sus propiedades no se ven afectadas por la temperatura. Por último, la muestra se recubre con una membrana de VITON que puede deformarse y evita la comunicación entre el fluido de la celda y el fluido de poro a altas temperaturas.

La celda triaxial está conectada a diferentes bombas como se muestra en la Fig. 3. Una primera bomba controla la presión de confinamiento, la segunda mantiene la presión de poro durante todas las etapas del proceso, y la tercera bomba se utiliza para realizar los ensayos de permeabilidad. Las pruebas de permeabilidad se realizan fluyendo agua a través de la muestra, en sentido vertical de abajo hacia arriba. Se utilizan transductores para el registro de presión, y la temperatura es controlada por una cámara ambiental y una termocupla, la cual se coloca cerca de la muestra para verificar y controlar la temperatura en el proceso.

3. Procedimiento

Las pruebas se realizan sobre muestras reconstituidas con material proveniente de un afloramiento de la formación Picacho localizado en la Cordillera Oriental de Colombia. Este material estaba totalmente saturado por aceite y agua, una vez extraídos los fluidos presentes en las muestras, se procede a la generación de los núcleos reconstituidos mediante compactación hasta alcanzar una porosidad mínima.

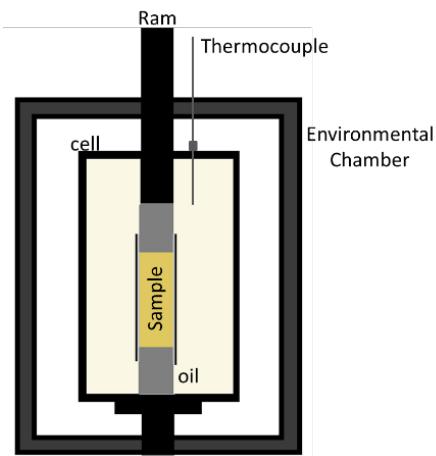


Figura 2. Esquema de la celda triaxial utilizada en las pruebas de evaluación de las muestras de la formación Picacho.

Fuente: Los Autores.

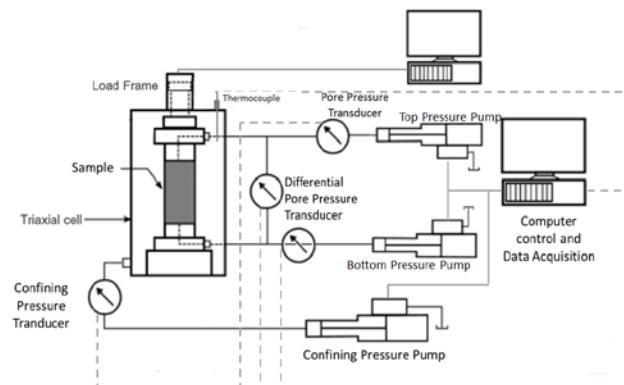


Figura 3. Esquema del montaje experimental utilizado para el programa de pruebas.

Fuente: Los Autores.

Las pruebas se realizan en diferentes etapas: saturación, consolidación isótropa y calentamiento. Las muestras reconstituidas, con porosidad promedio de 27%, 2.5 pulgadas de diámetro y 5 pulgadas de longitud, se saturan completamente con salmuera y se preservan en congelador para mantener el nivel de porosidad alcanzada durante la reconstitución. Para comprobar que la muestra está 100% saturada por un fluido incompresible, se realiza una prueba de Skempton, con la cual se aumenta el esfuerzo de confinamiento y se registra la variación de la presión de poro resultante del incremento de confinamiento, en un gráfico de presión de poro vs. esfuerzo de confinamiento se debe obtener una pendiente unitaria en arenas poco consolidadas [12].

La consolidación isótropa se lleva a cabo por etapas, en las que el esfuerzo de confinamiento se incrementa mientras la presión de poro permanece constante, lo que resulta en exceso de fluido en el medio poroso que es expulsado de la

muestra y por lo tanto el volumen de poro de la misma se reduce. Todas las muestras se llevan hasta un esfuerzo de confinamiento efectivo final de 1200 psi con el fin de tener el mismo punto de partida para todas las muestras a evaluar y posteriormente el esfuerzo de confinamiento se disminuye hasta las condiciones deseadas en función del programa de pruebas.

Dado el nivel de presión de poro inicial establecido en 800 psi para todas las muestras, en función de la profundidad del medio poroso a representar, y de acuerdo con la expresión propuesta por Terzaghi para evaluar el esfuerzo efectivo, Ecuación (1), los esfuerzos totales de confinamiento resultantes son 2000, 1380 y 858 psi, los cuales corresponden a valores de esfuerzos efectivos de confinamiento de 1200, 580 y 58 psi, respectivamente.

$$\sigma' = \sigma - p_p \quad (1)$$

Una vez se consolida la muestra a temperatura ambiente, aproximadamente 20°C, el calentamiento se realiza también por etapas. Para realizar las mediciones de permeabilidad a las temperaturas definidas. Las muestras se llevan a la temperatura deseada manteniendo constante el esfuerzo efectivo, con una tasa de calentamiento constante de 10°C/hora para evitar un choque térmico en las muestras que pueda provocar el triturado del grano. El proceso se monitorea mediante una termocouple ensamblada con la muestra. Una vez la termocouple registra un valor constante de la temperatura, se procede con el siguiente paso en el calentamiento. Durante el calentamiento, la temperatura registrada por la termocouple se monitorea constantemente al igual que el cambio de volumen en la bomba del sistema de presión de poro, lo cual posibilita el cálculo del cambio de volumen de poro como se detalla a continuación.

El volumen de la muestra es la suma del espacio poroso y el volumen del esqueleto sólido.

$$V_b = V_p + V_s \quad (2)$$

La porosidad se define como la razón entre el volumen poroso y el volumen total de la muestra.

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} \quad (3)$$

El cambio en el volumen total se puede calcular a partir del cambio del volumen poroso y del cambio del volumen de sólido, como resultado del proceso de confinamiento y calentamiento.

$$\delta V_b = \delta V_p + \delta V_s \quad (4)$$

El cambio de volumen registrado por la bomba de presión de poro corresponde a dos volúmenes diferentes, la expansión térmica isobárica del fluido situado dentro del espacio poroso de la muestra y el cambio en el volumen de poro resultante del aumento del volumen de sólido por expansión térmica (Ecuación 5).

Una termocupla instalada a la entrada de la bomba de presión de poro monitorea la temperatura de la bomba, para verificar que el cambio de volumen registrado por la bomba de presión no está afectado por procesos de expansión térmica del fluido al interior de la misma. Este monitoreo verifica que la termocupla muestra una temperatura constante a través de todos los experimentos, y por lo tanto, el cambio de volumen registrado sólo está asociado a los procesos internos en la muestra.

$$\delta V_{pore-pump} = \delta V_p + \delta V_{\Delta T-fl,p} \quad (5)$$

El cambio de volumen asociado a la expansión térmica del fluido de poro se puede calcular por la ecuación de expansión volumétrica térmica, Ecuación (6).

$$\delta V_{\Delta T-fl,p} = \alpha_T V_p \Delta T \quad (6)$$

Teniendo en cuenta que el coeficiente de expansión térmica del agua no es constante con la temperatura (Fig. 4), se realiza el cálculo por etapas del cambio de volumen de fluido por expansión térmica de acuerdo con los niveles de temperatura en las pruebas, con el fin de predecir de forma más precisa el cambio del volumen poroso y por ende el cambio en porosidad.

4. Resultados y discusión

La Fig. 5 muestra el cambio de volumen medido por la bomba que controla la presión de poro al igual que la temperatura medida al interior de la celda y de la bomba. El cambio de volumen se correlaciona perfectamente con el cambio de temperatura, lo que sugiere que el volumen que entra en la bomba resulta del proceso de expansión volumétrica como resultado del calentamiento de la muestra.

Como se mencionó anteriormente, la temperatura al interior de la bomba también se controla para verificar y controlar que el cambio de volumen que registra la bomba de presión de poro no está relacionado con la expansión térmica del fluido dentro de la propia bomba. Adicionalmente, los

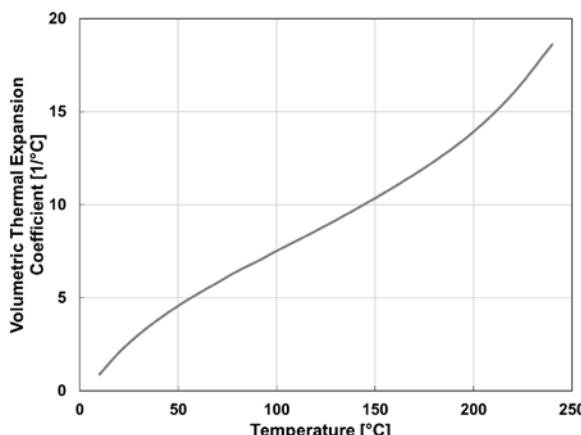


Figura 4. Comportamiento del coeficiente de expansión térmica del agua con temperatura.

Fuente: Los Autores.

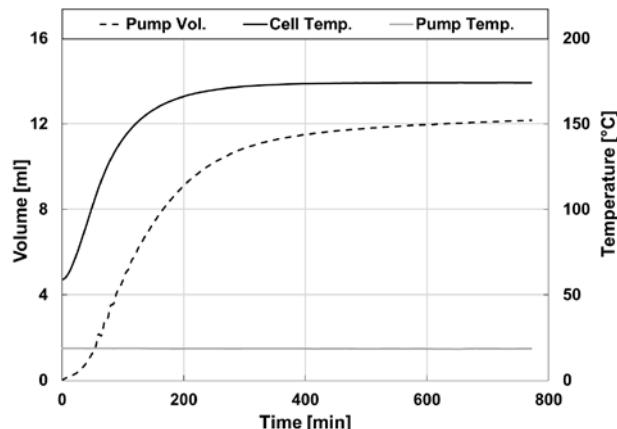


Figura 5. Comportamiento del volumen de la bomba y la temperatura de la muestra y de la bomba de presión de poro durante una etapa de calentamiento.

Fuente: Los Autores.

datos en la Fig. 5 evidencian que la temperatura en la bomba permanece constante mientras se calienta la muestra, lo cual implica que los cambios medidos por la bomba corresponden a cambios en el volumen del fluido en el sistema poroso por efectos de la expansión térmica de la salmuera y del esqueleto sólido de la muestra netamente.

Para verificar si el cambio de volumen medido en la bomba corresponde sólo a la expansión del agua o si también tiene un componente de cambio de volumen poroso, se presenta la expansión térmica del volumen poroso junto con el cambio de volumen registrado por la bomba durante el calentamiento de la muestra (Fig. 6). Dado que las muestras están totalmente saturadas con salmuera, la expansión de la salmuera se calcula sobre la base del volumen poroso inicial y su cálculo hace uso del coeficiente de expansión térmica en función de la temperatura, Fig. 4.

La Fig. 6 presenta los cambios de volumen medidos en la bomba que controla la presión de poro durante el proceso de calentamiento para dos esfuerzos de confinamiento, 58 y 1200 psi; y para efectos de comparación y análisis, se presenta la curva asociada con la expansión térmica teórica del agua (gris). En general, la curva del cambio de volumen asociado a la expansión del agua con temperatura es mayor que el cambio registrado en volumen con temperatura para las curvas a bajo y alto esfuerzo de confinamiento, lo que implica que el volumen poroso se está expandiendo en ambos casos. Las muestras están en un proceso progresivo de dilatación, lo que puede llevar a un incremento en la porosidad del medio.

La Fig. 7 muestra el cambio de volumen poroso durante el calentamiento para dos esfuerzos de confinamiento efectivos (58 y 1200 psi), el cálculo del cambio en el volumen poroso se realiza a partir de la Ecuación (5). Durante el calentamiento a bajo esfuerzo de confinamiento efectivo (58 psi) el volumen poroso de la muestra aumenta, lo que indica que la muestra está en condiciones de dilatación, esto induce un posible aumento en la porosidad de la muestra. De otro lado, a alto esfuerzo efectivo de confinamiento, 1200 psi, el

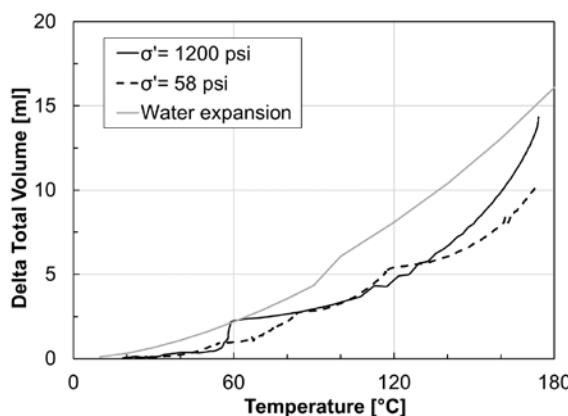


Figura 6. Delta de volumen total vs. temperatura a 58 y 1200 psi de esfuerzo de confinamiento.

Fuente: Los Autores.

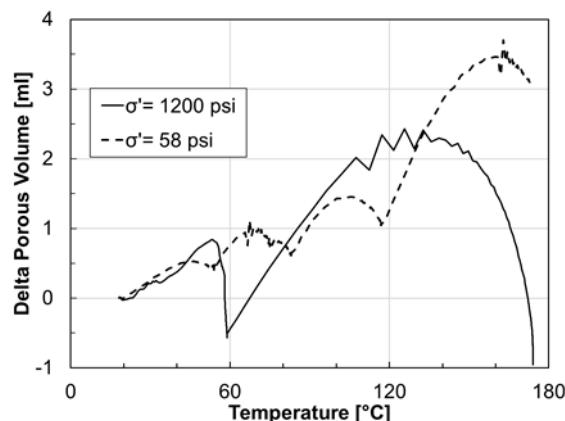


Figura 7. Delta de volumen poroso vs. temperatura a 58 y 1200 psi de esfuerzo de confinamiento.

Fuente: Los Autores.

cambio de volumen poroso aumenta mientras que el cambio de volumen registrado por la bomba (Fig. 6) es menor que el cambio de volumen asociado a la curva de expansión térmica teórica del agua a las mismas condición de temperatura. Para cuando el volumen en la bomba se acerca a la curva de expansión térmica del agua, el cambio de volumen poroso a 1200 psi disminuye, lo que significa una reducción del espacio poroso y por lo tanto una reducción de la porosidad.

La Fig. 8 presenta el cambio de volumen total de la muestra, el cual se obtiene del registro de la deformación volumétrica adquirido por los medidores internos de desplazamiento durante el proceso de calentamiento (Fig. 3). De acuerdo con la convención utilizada en este estudio, las deformaciones compresivas son positivas y las deformaciones extensionales o expansivas son negativas. Para ambas condiciones de esfuerzo de confinamiento, el volumen total de las muestras aumenta con la temperatura, sin embargo la prueba realizada a 58 psi de esfuerzo de confinamiento evidencia un aumento en el volumen total de la muestra mucho más significativo que el respectivo para la muestra evaluada a 1200 psi de esfuerzo efectivo de confinamiento.

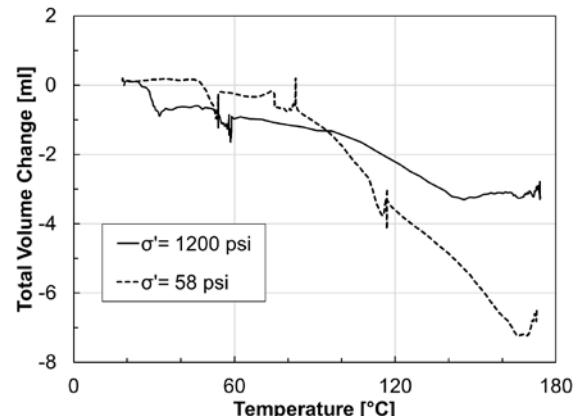


Figura 8. Delta de volumen total vs. temperatura a 58 y 1200 psi de esfuerzo efectivo de confinamiento. Fuente: Los Autores.

Estos resultados están en concordancia con las mediciones registradas por la bomba que controla la presión de poro (Fig. 7), en la cual para la muestra evaluada a bajo esfuerzo de confinamiento, 58 psi, se tiene un mayor aumento en el volumen de poro con el aumento en la temperatura. Esto lleva a que a una condición de esfuerzo de confinamiento bajo se presente probablemente un aumento tanto del volumen total de la muestra como del volumen poroso, y por ende un posible aumento en porosidad (Ecuación 3), por el contrario, para la muestra sometida a un alto confinamiento, se presenta un aumento en el volumen total y una disminución en el volumen poroso, lo que conlleva a una disminución de la porosidad de la muestra.

La Fig. 9 muestra el comportamiento de la porosidad normalizada con cambios de temperatura para dos valores de esfuerzo de confinamiento efectivo (58 y 1200 psi). A pesar que el comportamiento de ambas curvas es muy similar en las primeras etapas del calentamiento, la mayor diferencia en el comportamiento de porosidad normalizada a temperaturas elevadas sugiere que la influencia de la temperatura en los cambios de porosidad es mayor a bajo esfuerzo de confinamiento.

Adicionalmente, el comportamiento de la curva de porosidad normalizada a alto esfuerzo de confinamiento, 1200 psi, en el rango de alta temperatura difiere del comportamiento mostrado a bajo esfuerzo de confinamiento. Para el primer caso se presenta el retorno de la porosidad a los valores iniciales, mientras que a bajo esfuerzo de confinamiento, la porosidad presenta un incremento significativo con la temperatura. Los cambios de comportamiento están determinados por la capacidad del volumen total a cambiar con temperatura, pero dicho cambio esta modulado por el nivel de esfuerzo de confinamiento aplicado, lo cual concuerda con los resultados presentados por [7,10].

Como se mencionó anteriormente, el procedimiento experimental también incluyó medidas de permeabilidad adquiridas en las diferentes etapas durante el calentamiento. La temperatura se controla durante las pruebas de permeabilidad para asegurar que permanece constante y que

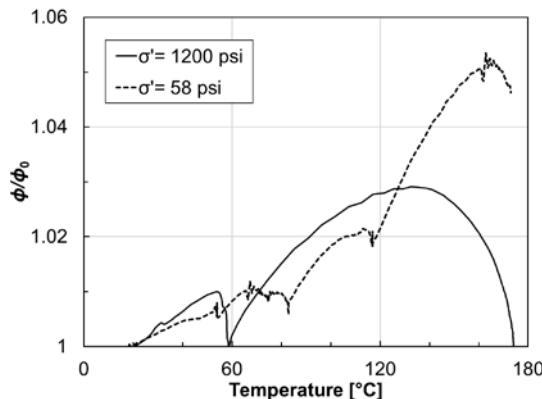


Figura 9. Comportamiento de la porosidad normalizada con temperatura a 58 y 1200 psi de esfuerzo efectivo de confinamiento.

Fuente: Los Autores.

el fluido se calienta antes de que fluya a través de la muestra. La Tabla 1 presenta las gráficas que ilustran el comportamiento de la permeabilidad de las muestras durante el calentamiento para diferentes condiciones de esfuerzo efectivo de confinamiento. La permeabilidad a un alto esfuerzo de confinamiento, tiende a disminuir cuando la temperatura aumenta; mientras que la permeabilidad a bajo esfuerzo de confinamiento (58 psi) aumenta hasta cierto nivel de temperatura para luego disminuir en el rango de temperaturas mayores.

La permeabilidad medida en las muestras sometidas a un esfuerzo de confinamiento efectivo de 1200 psi, tercera columna de la Tabla 1, manifiestan una reducción notable del orden de 75% a 230°C y de 50% a 120°C. En igual sentido, la permeabilidad evaluada a 580 psi de esfuerzo de confinamiento presenta una disminución menos significativa con temperatura, del orden de 57%.

Finalmente, el comportamiento de la permeabilidad con temperatura a bajo esfuerzo efectivo de confinamiento, primera columna de la Tabla 1, presenta un aumento del 33% en la permeabilidad en el rango de 20 a 80°C, pero a temperaturas superiores a 120°C aproximadamente, la permeabilidad recupera su valor original seguido de una pérdida de permeabilidad significativa del orden del 56% a 180°C.

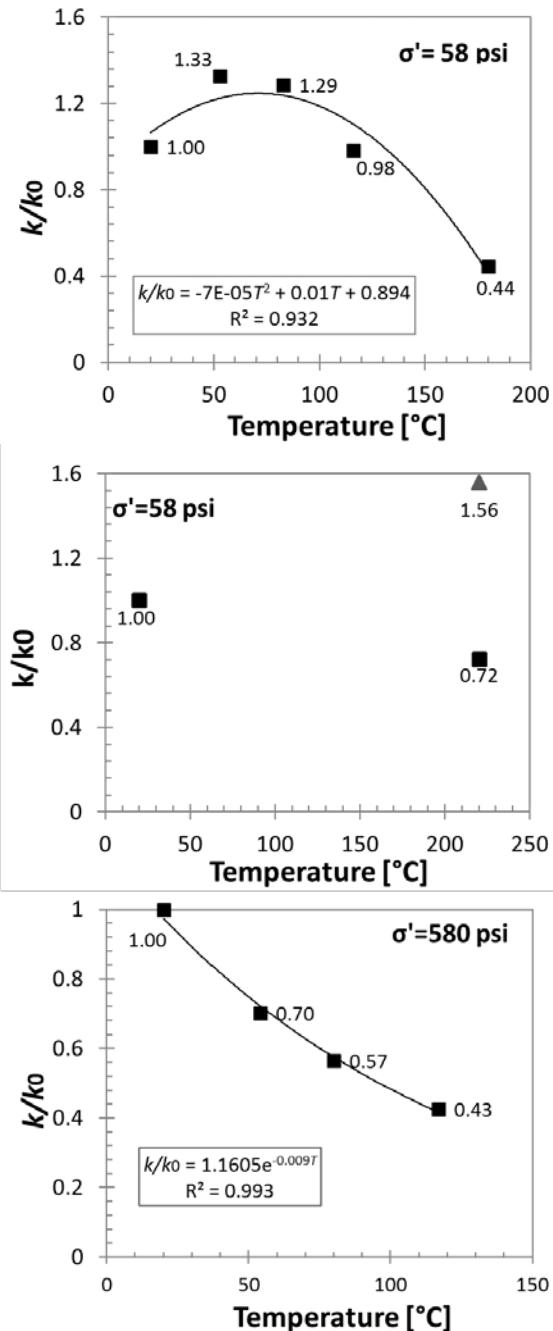
A partir de los resultados experimentales se puede definir que el nivel de disminución de la permeabilidad en la formación Picacho depende del nivel de confinamiento al que se someta la muestra; es decir, que a medida que el confinamiento de la muestra aumente también lo hará el nivel de reducción de la permeabilidad.

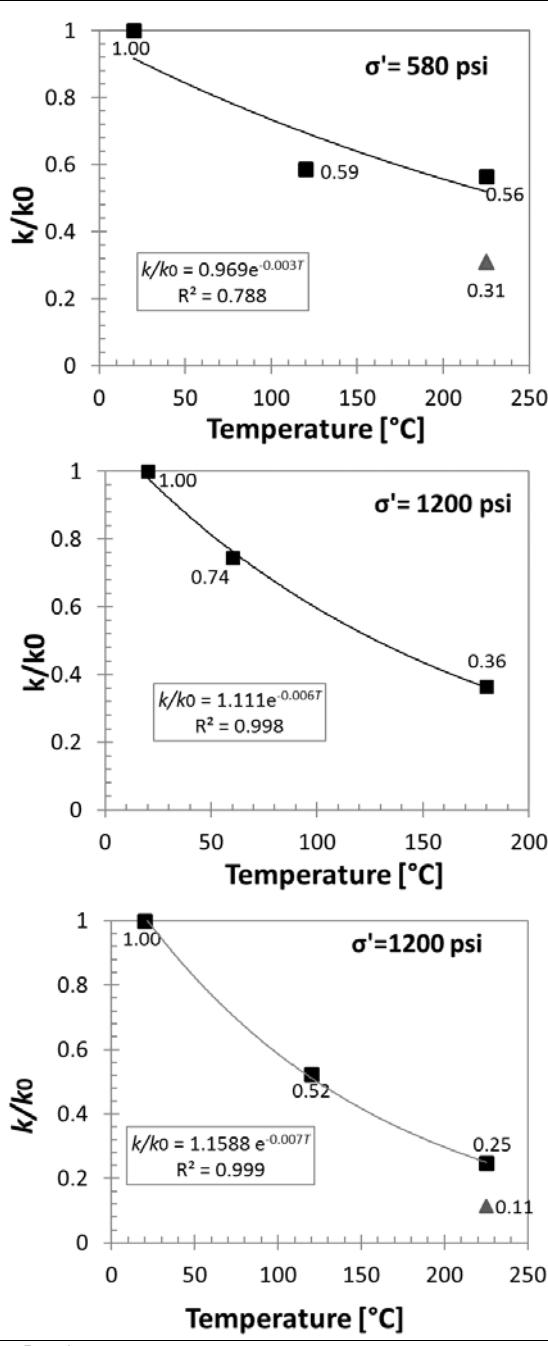
Los resultados a esfuerzos de confinamiento efectivo altos muestran que la reducción de la porosidad de las muestras conduce a una pérdida de permeabilidad. Todas las gráficas analizadas en este trabajo muestran un comportamiento exponencial con coeficientes de correlación muy cercanos a 1. Esto sugiere que la temperatura podría tener un efecto similar al esfuerzo de confinamiento como lo han propuesto Pedrosa *et al.* (1992) [13]. La relación exponencial entre permeabilidad y esfuerzo de

confinamiento se ha generalizado en la comunidad académica e industrial para modelar los cambios de permeabilidad debido a los cambios en la presión de poro resultantes de los procesos de inyección / producción de fluido en yacimientos de petróleo y gas. Sin embargo, como se ha mencionado antes, con bajo esfuerzo de confinamiento la relación entre temperatura y permeabilidad es diferente ya que el volumen poroso tiene la posibilidad de expandirse.

Tabla 1.

Comportamiento de la permeabilidad normalizada durante el calentamiento para tres esfuerzos de confinamiento.





Fuente: Los Autores.

5. Conclusiones

Se realizaron pruebas experimentales con el fin de determinar el efecto de la temperatura y el esfuerzo efectivo de confinamiento sobre las propiedades petrofísicas de núcleos reconstituidos con material de la formación Picacho. A partir del trabajo experimental realizado, se puede concluir que:

- El nivel del esfuerzo de confinamiento al que está sometido un medio poroso no consolidado presenta una influencia significativa en el comportamiento de la

porosidad y permeabilidad del mismo. A bajo esfuerzo de confinamiento, formación a profundidad somera, la porosidad y permeabilidad aumentarían su magnitud en función del aumento de la temperatura. A condición de alto esfuerzo de confinamiento, yacimiento a mayor profundidad, la permeabilidad disminuye al aumentar la temperatura, pero dicho efecto no es evidente en el comportamiento de la porosidad.

- Los cambios de volumen asociados a la expansión por temperatura de los fluidos al interior del medio poroso y a la expansión de la matriz sólida que constituye la muestra están fuertemente modulados por el nivel o magnitud del esfuerzo efectivo de confinamiento.
- A mayor esfuerzo efectivo de confinamiento, mayor es la reducción de la permeabilidad del medio poroso durante el proceso de calentamiento.
- En términos de porosidad se concluye que aunque todas las muestras presentan un incremento en el volumen total, solo las muestras sometidas a bajos confinamientos (58 psi) presentan un incremento en el volumen poroso, y por ende un incremento en porosidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible por el aporte del proyecto de investigación COLCIENCIAS – ECOPETROL 0264-2013 y a la Universidad Nacional de Colombia. Los autores también desean reconocer la contribución del personal del laboratorio GeoREF de la Universidad de Alberta, como parte de un acuerdo de colaboración entre el Grupo de Investigación de Geomecánica de Yacimiento (RG²) de la Universidad de Alberta y el Grupo de Investigación en Geomecánica Aplicada (GIGA) de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Nomenclatura

σ' :	Esfuerzo efectivo
σ :	Esfuerzo total
p_p :	Presión de poro
V_b :	Volumen total
V_p :	Volumen poroso
V_s :	Volumen sólido
ϕ :	Porosidad
V_{fl} :	Volumen del fluido en el sistema poroso
$\delta V_{\Delta T-fl,p}$:	Cambio del volumen de fluido asociado a la expansión térmica de la salmuera
α :	Coeficiente volumétrico de expansión térmica
T :	Temperatura
k :	Permeabilidad

Referencias

- [1] Sanyal, S., Marsden, S. and Ramey, H., Effect of temperature on petrophysical properties of reservoir rocks. Proceedings of California Regional Meeting, SPE – 4898, 1974. DOI: 10.2118/4898-MS

- [2] Gupta, A. and Civan, F., Temperature sensitivity of formation damage in petroleum reservoirs. Proceeding of Formation Damage Control Symposium. SPE – 27368, 1994. DOI: 10.2118/27368-MS
- [3] Chen, G. and Ewy, R.T., Thermoporoelastic effect on wellbore stability. SPE Journal, 10(2), pp. 121-129, 2005. DOI: 10.2118/89039-PA
- [4] Horsrud, P.H., Holt, R.M. and Renlie, L., Drilling induced formation damage - Stress and temperature effects. Proceedings of 32nd U.S Symposium on Rock Mechanics. ARMA-91-423, [online]. 1992. Available at: <https://www.onepetro.org/download/conference-paper/ARMA-91-423?id=conference-paper%2FARMA-91-423>
- [5] Dusseault, M.B., Stress changes in thermal operations. Proceedings of SPE International Thermal Operations Symposium. SPE – 25809, 1993. DOI: 10.2118/25809-MS
- [6] Benzagouta, M.S. and Amro, M.M., Pressure and temperature effect on petrophysical characteristics: Carbonate reservoir case. Proceedings of SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium. SPE – 126045, 2009. DOI: 10.2118/126045-MS
- [7] Yu, J., Chen, S., Chen, X., Zhang, Y. and Cai, Y., Experimental investigation on mechanical properties and permeability evolution of red sandstone after heat treatments. Journal of Zhejiang University – Science A, 16(9), pp. 749-759, 2015. DOI: 10.1631/jzus.A1400362
- [8] Scott, J., Proskin, S. and Adhikary, D., Volume and permeability changes with steam stimulation in an oil sands reservoir. Journal of Canadian Petroleum Technology, 33(7), pp. 44-52, 1994. DOI: 10.2118/94-07-06
- [9] Chalaturnyk, R.J., Geomechanics of the steam assisted gravity drainage process in heavy oil reservoirs, PhD dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, 1995. DOI: 10.7939/R39W0971Z
- [10] Tran, D., Nghiem, L., Buchanan, L., Geilikman, M., Leshchyshyn, T., Hannan, S. and Wong, S., Modelling thermal geomechanical effects on simulation porosity. Proceedings of 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd Canada Rock Mechanics Symposium. ARMA – 08 – 087, [online]. 2008. Available at: <https://www.onepetro.org/download/conference-paper/ARMA-08-087?id=conference-paper%2FARMA-08-087>
- [11] Hassanzadegan, A., Blo, G., Milsch, H. and Urpi, L., The effects of temperature and pressure on the porosity evolution of Flechtinger sandstone. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(2), pp. 421-434, 2014. DOI: 10.1007/s00603-013-0401-z
- [12] Arias-Buitrago, J.A., Efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas y petrofísicas de formaciones de crudo pesado, MSC. Tesis, Departamento de Procesos y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, [en línea]. 2015. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/5431>
- [13] Pedrosa Jr, O.A. and Kikani, J., Perturbation analysis of stress-sensitive reservoirs. SPE Formation Evaluation, 6 (3), pp. 379-386, 1992. DOI: 10.2118/20053-PA

G. Alzate-Espinosa, recibe su título de Ing. de Petróleos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín en 1989, el título de MSc. en Ciencias en Ingeniería de Petróleos de New Mexico Institute of Mining and Technology en 2001. Desde 1988 hasta 1993, trabajó en empresas de la industria del petróleo en Colombia y Venezuela, y desde 1994 ha estado vinculado a la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. En la actualidad es profesor asociado en dedicación exclusiva del Departamento de Procesos y Energía en el programa de Ingeniería de Petróleos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín; y coordinador del Grupo de Investigación en Geomecánica Aplicada (GIGA). Las áreas de interés en investigación son: evaluación y monitoreo de formaciones geológicas con registros de pozo en hueco abierto y entubado, geomecánica aplicada a la ingeniería de yacimientos, fracturamiento hidráulico, producción de arena. ORCID: 0000-0001-6265-274X

J.A. Arias-Buitrago, recibe su título de Ing. de Petróleos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín en 2012, el título de MSc. en Ciencias

en Ingeniería de Petróleos de Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín en 2016, es actualmente estudiante de Doctorado en Ingeniería Geotécnica de la Universidad de Alberta, actualmente hace parte del grupo de Investigación “Reservoir Geomechanics Research Group” (RG2). Los intereses de investigación son: comportamiento geomecánico y los riesgos asociados involucrados en la producción con recobro térmico de yacimientos de crudo de pesado. Juan cuenta con experiencia en pruebas experimentales, simulación acoplada y monitoreo de operaciones. ORCID: 0000-0002-5005-8556

C.B. Morales-Monsalve, recibe su título de Ing. de Petróleos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín en 2015. Desde 2014 ha estado vinculado al Grupo de Investigación en Geomecánica Aplicada (GIGA) y a partir del 2016 es estudiante de la maestría en ingeniería – ingeniería de petróleos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Las áreas de interés en investigación son: geomecánica aplicada a la ingeniería de yacimientos, fracturamiento hidráulico, comportamiento mecánico de medios porosos, termo-poro elasticidad, entre otros. ORCID 0000-0003-0091-3240

A. Arbelaez-Londoño, recibe su título de Ing. de Petróleos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín en 1998, el título de MSc. en Ciencias en Ingeniería de Petróleos de New Mexico Institute of Mining and Technology en 2001 y candidata a Doctorado en Ingeniería – Sistemas Energéticos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Docente ocasional del Departamento de Procesos y Energía en el programa de Ingeniería de Petróleos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín de 2004 a 2017. Investigadora del Grupo de Geomecánica Aplicada – GIGA desde 2010 a la fecha. Las áreas de interés en investigación son: geomecánica aplicada a la ingeniería de yacimientos, fracturamiento hidráulico, producción de arena, producción en frío de crudos pesados con arena (CHOPS), simulación numérica de yacimientos, entre otras. ORCID 0000-0003-0570-5125

A. Naranjo-Agudelo, recibe su título de Ing. de Petróleos en 1978 de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, y desde ese mismo año es profesor asociado del Departamento de Procesos y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Entre sus intereses de investigación se incluye: geomecánica aplicada a la ingeniería de petróleos, simulación de yacimientos, pruebas de presión, yacimientos naturalmente fracturados, entre otros. ORCID 0000-0003-1451-374X

R. Chalaturnyk, recibe su título de Dr. en Ingeniería Civil, de la Universidad de Alberta, Canadá en 1997 y desde ese mismo año hace parte del grupo profesoral del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la misma Universidad, adicionalmente preside la investigación en geomecánica de yacimientos en la Fundación CMG y es el director del Grupo de Investigación en Geomecánica (RG2) de la Universidad de Alberta, Canadá. Entre sus intereses de investigación se incluye: captura y secuestro de CO₂, geomecánica aplicada a yacimientos de hidrocarburos, entre otras. ORCID: 0000-0002-7511-7823

G. Zambrano, recibe su título de Ing. Civil de la Universidad Pontificia Javeriana, Colombia en 2002 y su título de Dr. en Ingeniería Civil de la Universidad de Alberta, Canadá en 2002. Actualmente se desempeña como asistente de investigación senior del Grupo de Investigación en Geomecánica (RG2). Entre sus intereses de investigación se incluye: captura y secuestro de CO₂, geomecánica aplicada a yacimientos de hidrocarburos, entre otras. ORCID 0000-0003-1475-5730

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. 42

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

En Todograficas Ltda.

Medellín - Colombia

Geological itinerary of the coastal strip between the Simon Bolivar International Airport and the Taganga Bay, Santa Marta Geotectonic Province
Julie Andrea Sáenz-Reyes, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón

V/H spectral ratios associated with reverse faults of Quito city
Roberto Aguiar-Falconi, Eduardo López-Moreno & Diego Quizanga-Martínez

Focal mechanism construction in the north of the Colombian Central Cordillera from record the national seismological network of Colombia
Gustavo Posada, Gaspar Monsalve & Ana María Abad

Improvement of the breakage through the drilling deviations control, case "El Roble" mine, Colombia
Juan David Rincón-Durán & Jorge Martín Molina-Escobar

Education in Geology on the Escuela Nacional de Minas de Medellín, 1910-1937
Yohana Josefina Rodríguez-Vega & Yobenj Aucardo Chicangana-Bayona

Permeability and porosity changes in unconsolidated porous media due to variations of confining stress and temperature - An experimental study
Guillermo Alzate-Espinoza, Juan Alejandro Arias-Buitrago, Cristhian Bernardo Morales-Monsalve, Alejandra Arbelaez-Londoño, Abel Naranjo-Agudelo, Rick Chalaturnyk & Gonzalo Zambrano

Itinerario geológico de la franja costera entre el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta
Julie Andrea Sáenz-Reyes, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón

Relaciones V/H para espectros asociados a las fallas inversas de la ciudad de Quito
Roberto Aguiar-Falconi, Eduardo López-Moreno & Diego Quizanga-Martínez

Construcción de mecanismos focales en el norte de la Cordillera Central colombiana a partir de registros de la red sismológica nacional de Colombia
Gustavo Posada, Gaspar Monsalve & Ana María Abad

Mejoramiento del arranque mediante el control de las desviaciones de perforación, caso mina "El Roble", Colombia
Juan David Rincón-Durán & Jorge Martín Molina-Escobar

La enseñanza de la geología en la Escuela Nacional de Minas de Medellín, 1910-1937
Yohana Josefina Rodríguez-Vega & Yobenj Aucardo Chicangana-Bayona

Cambios en la permeabilidad y porosidad de medios porosos no consolidados debido a cambios en el esfuerzo de confinamiento y la temperatura - Un estudio experimental
Guillermo Alzate-Espinoza, Juan Alejandro Arias-Buitrago, Cristhian Bernardo Morales-Monsalve, Alejandra Arbelaez-Londoño, Abel Naranjo-Agudelo, Rick Chalaturnyk & Gonzalo Zambrano