

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

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

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

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

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

Abstract

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

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

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

Resumen

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

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

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

1. Introducción

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

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

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

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

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

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

2. Localización y marco geológico

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

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

3. Metodología

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



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

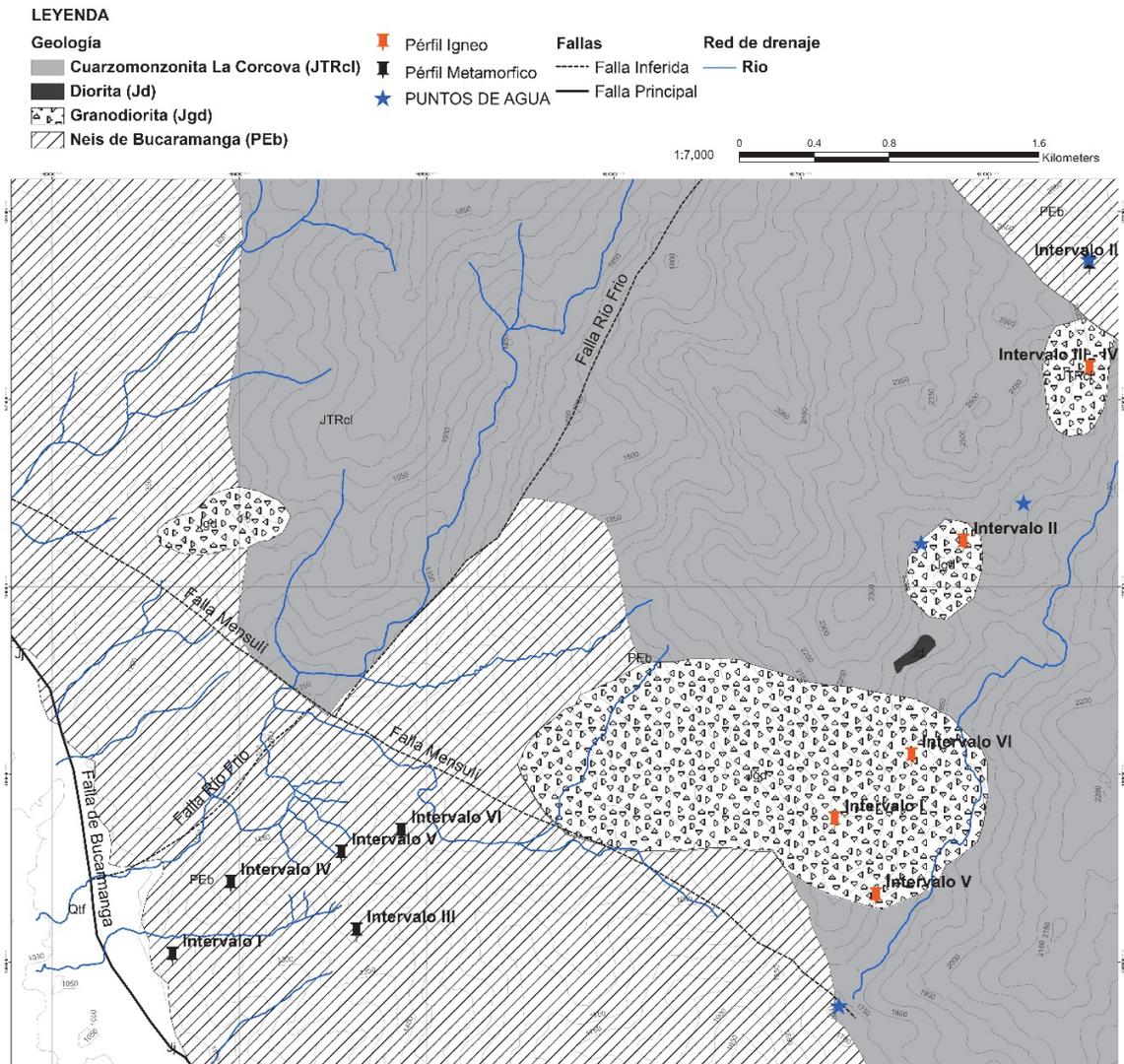


Figura 2. Mapa Geológico del área de estudio: Microcuencas del Río Lato y Río Oro Alto a escala 1:8.000, se observan los afloramientos representativos para el perfil de roca de Néisica de color negro y de color rojo los afloramientos representativos del perfil de roca Granodiorítica. Las estrellas de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

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

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

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

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

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

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

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

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

4. Resultados

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

4.1. Descripción de propiedades físicas

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

Tabla 1.

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

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

Fuente: Los autores

En el caso del perfil de roca metamórfica el intervalo de meteorización I (Tabla 3), presenta una tonalidad Strong Brown 7.5 YR de color café correspondiente a un valor cromático de 5/8 mientras que el intervalo de meteorización VI (Tabla 3), presenta tonalidades Reddish Yellow 7.5 YR de color rosa con un valor cromático de 8/6. En el perfil de rocas Ígneas el intervalo de meteorización I (Tabla 3): Roca fresca presenta tonalidad Yellow 2.5 YR de color beige (café claro) y valor cromático de 8/6 mientras que el intervalo de meteorización VI, presenta tonalidad Pink 7,4YR de color rosa claro con un valor cromático de 8/4. La decoloración en cada uno de los perfiles de meteorización, muestra la alteración de minerales, aparición de óxidos y transformación de roca original, dando como resultado un suelo residual correspondiente al intervalo de meteorización VI.

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

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

4.2. Definición de los perfiles de meteorización

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

Tabla 2 .

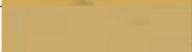
Medida Cualitativa del Grado de Resistencia Mecánica, utilizado para la caracterización de ambos perfiles de meteorización (Roca Ígnea y Metamórfica).

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

Fuente: Brown ,1981. [6]

Tabla 3.

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

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

Fuente: Modificado de Munsell ,1994.

Tabla 4.

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

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

Fuente: Los autores.

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

4.3. Descripción petrográfica y mineralógica

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

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

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

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

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



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

Fuente: los autores

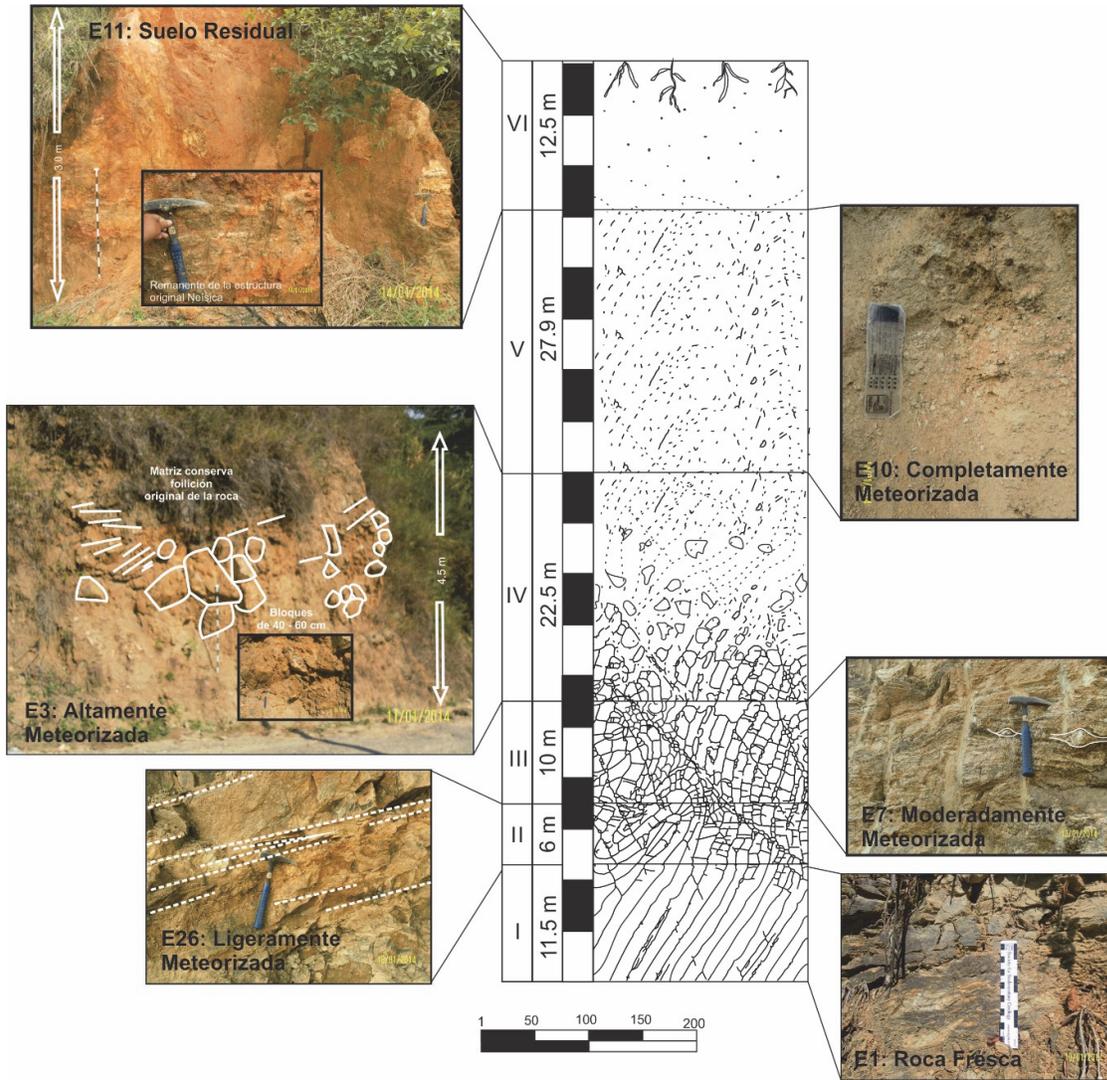


Figura 4. Columna generalizada del perfil de roca Néisica, a escala real (espesores de cada uno de los intervalos de meteorización, tomados en campo), rasgos representativos, Intervalo I: Planos de foliación, bandas composicionales y fracturas en menor proporción, Intervalo II: incremento en la densidad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

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

4.4. Definición de la Meteorización química mediante FRX.

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

En el perfil de Roca Granodiorítica, los valores tienden a aumentar mayoritariamente en los intervalos de meteorización III, IV y VI, equivalentes a la Roca Moderadamente, Altamente Meteorizada y el Suelo Residual respectivamente, pero sin embargo el dato del intervalo VI está por encima del promedio de los datos. Además los Óxidos mayores muestran que en el perfil de roca Granodiorítica el orden de abundancia es $SiO_2 > Al_2O_3 > K_2O$, conservándose esta relación con el aumento de la meteorización, mientras el contenido de Fe_2O_3 , CaO y Na_2O varía respecto a los intervalos de meteorización, por último el contenido de MgO y TiO_2 es muy bajo durante todo el perfil.

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

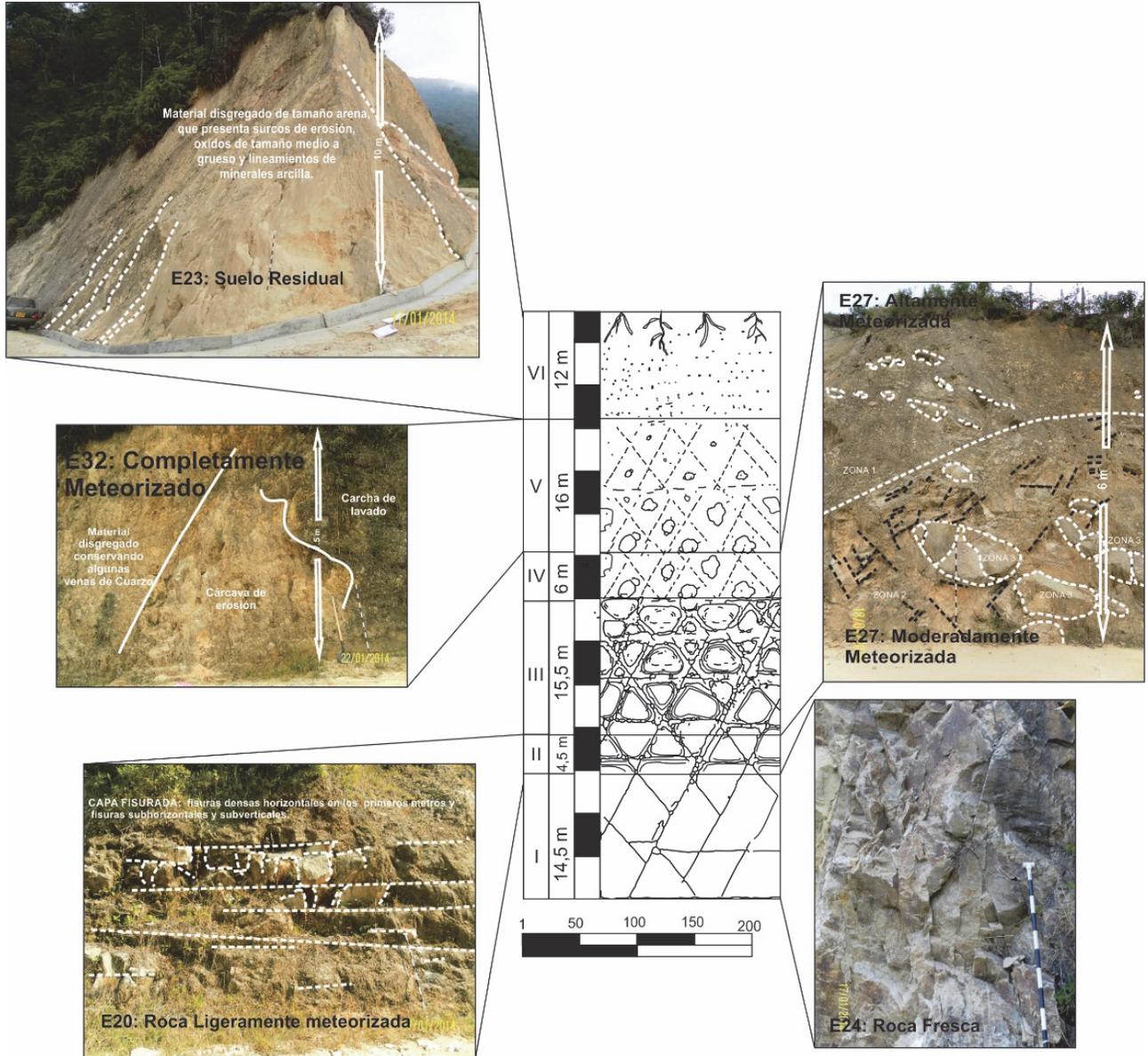


Figura 5. Columna generalizada del perfil de roca Granodiorítica, a escala real (espesores de cada uno de los intervalos de meteorización, tomados en campo), rasgos representativos, Intervalo I: Altamente diaclasado, Intervalo II: Fisuras Sub-horizontales y sub-verticales en mayor densidad, Intervalos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

Fuente: Los autores.

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

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

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

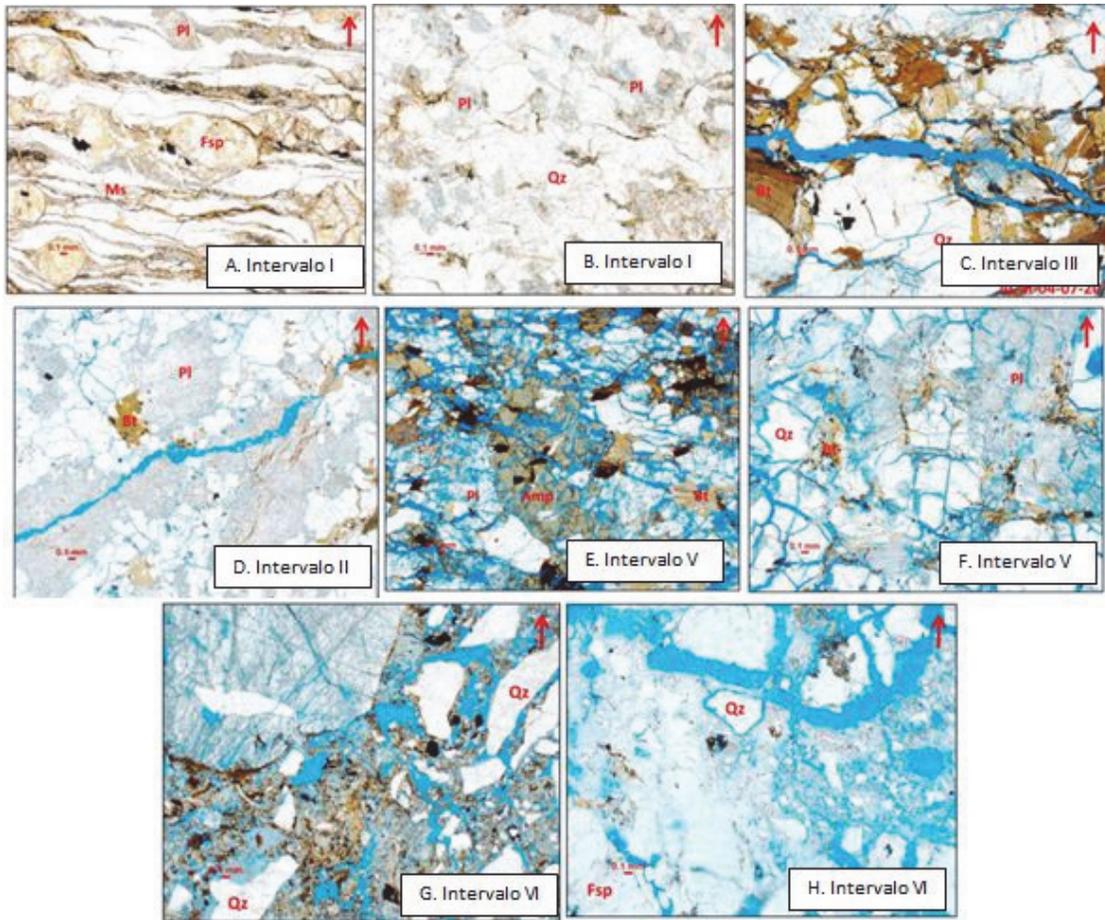


Figura 6. Fotomicrografías orientadas (el Norte es indicado por la flecha roja) (A, Neis) y (B, Granodiorita) roca fresca con ausencia de micro-fracturamiento, (C, Neis) y (D, Granodiorita) micro-fracturamiento que atraviesa la roca, (E, Neis) y (F, Granodiorita) la textura de la roca original ha desaparecido,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

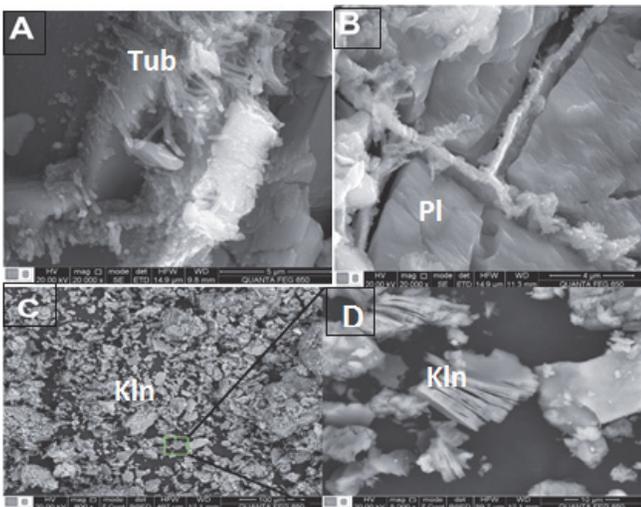


Figura 7. Microfotografías tomadas de SEM del perfil de roca Granodiorítica. A) Mineral de morfología Tubular, B) alteración química en granos de Plagioclasa, C) matriz de caolinita en intervalo de meteorización VI y D) Caolinita.
Fuente: Los autores.

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

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

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

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

4.5. Análisis de propiedades Hidrogeológicas

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

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

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

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

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

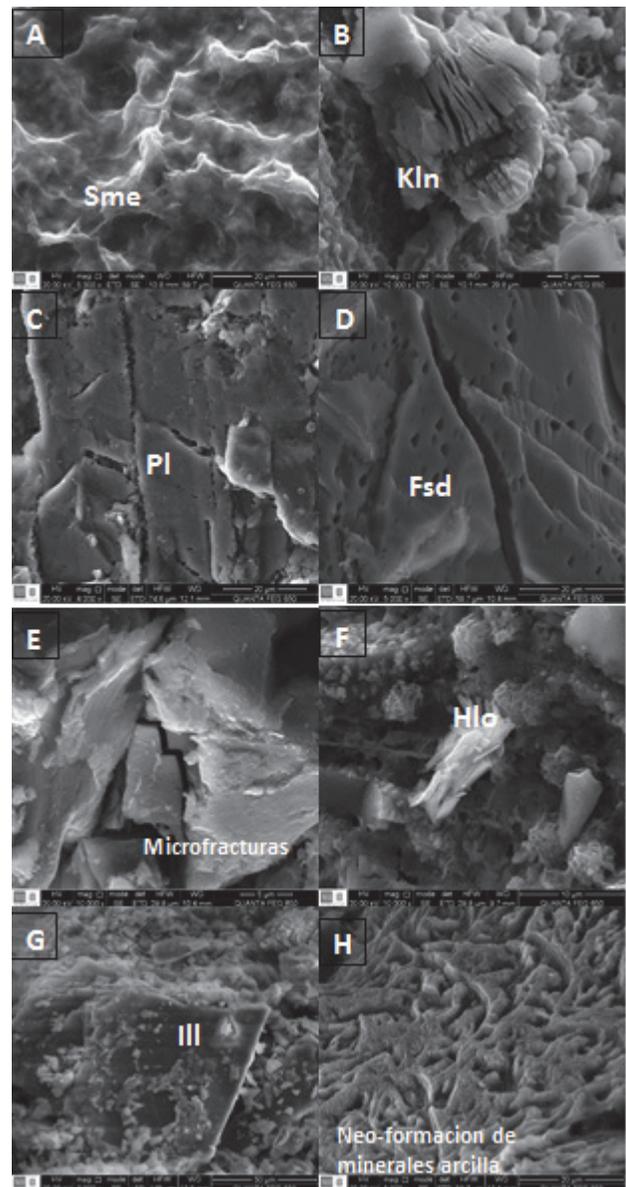


Figura 8. Microfotografías tomadas de SEM del perfil de roca Néisica. A) Esmectita, B) Caolinita, C) Micro-fracturas paralelas en granos de Plagioclasa, D) alteración química en granos de Feldespato, E) micro-fracturas, F) halloysita, G) Illita y H) neo-formación de minerales arcilla (Borrelli et al.,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

Fuente: Los autores.

Tabla 5.

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

Óxidos mayores en el perfil granodiorítico												
INTERVALO	SiO2	Al2O3	K2O	Fe2O3	CaO	Na2O	MgO	P2O5	TiO2	L.O.I	R	CIA
I	69.69	15.67	7.01	1.57	1.01	3.20	0.18	0.04	0.22	1.20	4.45	58.27
II	67.52	16.70	5.43	2.29	0.40	4.98	0.44	0.13	0.47	1.30	4.04	60.71
III	66.41	17.85	5.34	3.10	1.10	1.35	0.66	0.02	0.46	3.40	3.72	69.62
IV	65.50	18.33	5.71	3.36	1.24	0.73	0.46	0.03	0.47	3.80	3.57	70.47
V	68.64	16.88	6.50	2.10	0.72	1.97	0.38	0.02	0.29	2.20	4.07	64.75
VI	66.63	18.86	6.35	2.19	0.81	0.66	0.34	0.01	0.28	3.60	3.53	70.69
Óxidos mayores en el perfil néisico												
INTERVALO	SiO2	Al2O3	K2O	Fe2O3	CaO	Na2O	MgO	P2O5	TiO2	L.O.I	R	CIA
I	77.59	10.87	3.52	2.69	0.64	1.83	0.55	0.04	0.39	1.60	7.14	64
II	73.78	11.48	2.23	4.37	2.20	2.15	0.95	0.15	0.52	1.80	6.43	64
III	66.85	15.74	4.50	3.70	2.41	3.51	1.23	0.06	0.52	1.20	4.25	60
IV	63.55	14.29	3.20	14.29	1.94	2.14	2.22	0.04	1.41	2.30	4.45	66
V	53.83	17.01	1.08	2.10	4.57	2.11	2.36	0.15	1.08	6.20	3.16	69
VI	56.99	23.48	2.67	6.43	87ppm	0.04	0.89	0.02	0.74	8.50	2.43	90

Fuente: Los autores.

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

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

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

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

Tabla 6.

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

Perfil Néisico		
Intervalo de meteorización	$\phi = 1 - (Vg/Vtotal)$	Clasificación
VI	40,44	Alta
V	36,22	
IV	-	-
III	12,49	Regular
II	3,02	Mala
I	3,34	
Perfil Granodiorítico		
Intervalo de meteorización	$\phi = 1 - (Vg/Vtotal)$	Clasificación
VI	32,7	Alta
V	32,86	
IV	28,48	Regular
III	12,67	
II	11,63	
I	4,67	Mala

Fuente: Los autores

Tabla 7.

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

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

Fuente: Los autores.

5. Conclusiones

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Referencias

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

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

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

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

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