

Caracterización del potencial de generación de acidez en rocas presentes al oriente del municipio  
de Titiribí, Antioquia

Angélica María Romero Lozano

Juan Manuel Villamarín Zamora

Universidad EAFIT

Departamento de Geología

Medellín

2022

Caracterización de rocas con potencial de generación de acidez en el municipio de Titiribí,  
Antioquia

Angélica María Romero Lozano

Juan Manuel Villamarín Zamora

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Geólogo

Asesor:

Geólogo. Ph.D. Diego Felipe Gómez Gutiérrez

Universidad EAFIT

Departamento de Geología

Medellín

2022

## **Agradecimientos**

### *Angélica*

A mis padres por el apoyo, dedicación, confianza y motivación incondicional. Gracias a la vida por ustedes y por tenerlos a mi lado; a la mita y mi ahijado, mis estrellitas en el cielo que me guían y me acompañan.

A Ana y Juan por siempre darme ánimos y ser incondicionales en todo momento. Sin duda son las mejores personas que conocí en la U. A los Camilos y a Yan por siempre brindarme su apoyo y su amistad.

Finalmente, a la Universidad EAFIT y a todos los profesores por la oportunidad, el conocimiento, la dedicación, tiempo y todo el aprendizaje transmitido y adquirido a lo largo de este camino de la vida profesional.

### *Juan*

Quiero agradecer principalmente a mis padres Hernán y Lidy, por su amor y apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida, pero sobre todo por ser un excelente ejemplo a seguir. A mis hermanos por ser parte importante de mi vida y siempre estar presentes en momentos difíciles.

A mis amigos, especialmente a Angélica por haber sido una excelente compañera de tesis y amiga, por haberme tenido la paciencia necesaria y motivarme a seguir adelante en momentos difíciles y siempre estar presente, y a Camilo por ser una persona incondicional, un gran amigo y sobre todo por hacer de su familia, una familia para mí.

También quiero agradecer a la universidad EAFIT por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo este proceso y a los profesores por la confianza, apoyo y dedicación de tiempo.

## Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	8
<b>2. Generalidades</b>	9
2.1 Pregunta de investigación	9
2.2 Hipótesis	9
2.3 Objetivos	10
2.3.1 Objetivo general	10
2.3.2 Objetivos específicos	10
<b>3. Zona de estudio</b>	11
3.1 Localización	11
3.2 Clima	11
3.3 Geología regional	11
3.4 Geología local	12
3.4.1 Diorita de Pueblito	13
3.4.2 Formación Amagá	13
3.4.3 Formación Combia	14
3.4.4 Formación Quebradagrande	14
3.4.5 Grupo Ayurá-Montebello	14
3.4.6 Rocas hipoabisales	15
3.5 Geomorfología	15
3.6 Hidrografía	16
3.6.1 Cuenca del río Cauca	16
3.6.2 Subcuenca quebrada Sinifaná	16
3.6.3 Subcuenca quebrada Amagá	17
<b>4. Marco conceptual</b>	17
4.1 Meteorización	17
4.1.1 Perfil de meteorización	17
4.2 Drenaje ácido	18
<b>5. Métodos</b>	20
5.1 Fase 1	21
5.1.1 Revisión bibliográfica	21
5.1.2 Etapa de campo	21
5.1.3 Caracterización mineralógica	21

5.1.4	Diagramas Deere & Patton.....	22
5.1.5	Sistemas de información geográfica (ArcGis) .....	22
5.1.6	Hidrología.....	22
<b>6.</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>23</b>
6.1	Rocas sedimentarias (Formación Amagá).....	23
6.2	Rocas ígneas (Diorita de pueblito y Rocas hipoabisales porfídicas).....	25
6.3	Rocas metamórficas (Grupo Ayurá-Montebello).....	26
6.4	Propuesta metodológica enfocada en determinar el potencial de acidez en cuencas hidrográficas.....	26
6.5	Columna estratigráfica de la Formación Amagá .....	27
6.6	Perfiles de meteorización.....	28
<b>7.</b>	<b>Discusión</b> .....	<b>30</b>
7.1	Caracterización cualitativa y semi cuantitativa del potencial de generación de acidez (PGA). .....	30
7.2	Factores que controlan la generación de DAR .....	32
7.3	Impacto en los cuerpos de agua.....	33
7.4	Medidas de control y mitigación de impactos .....	33
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>34</b>
<b>9.</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>35</b>
<b>10.</b>	<b>Referencias</b> .....	<b>36</b>
<b>11.</b>	<b>Anexos</b> .....	<b>42</b>

### **Lista de figuras**

Figura 1. Ubicación y geología de la zona de estudio.....	11
Figura 2. Etapas de formación drenajes ácidos (INAP, 2009).....	20
Figura 3. Materiales y métodos. ....	21
Figura 4. Diagrama ternario de clasificación QFL (Cuarzo, feldespato y líticas). Tomado y modificado de Folk (1974).....	23
Figura 5. Diagramas de clasificación QAP para rocas plutónicas y volcánicas. Tomado y modificado de Strenckeinsen (1979 y 1972).....	25
Figura 6. Determinación de potencial de acidez en cuencas hidrográficas.....	27
Figura 7. Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio. ....	28
Figura 8 a, b y c. Perfiles de meteorización de la zona de estudio.....	30

### **Lista de tablas**

Tabla 1. Potencial de generación de acidez para las diferentes litologías.....	32
--	----

### **Lista de anexo de figuras**

Figura S 1. Herramientas y técnicas utilizadas .....	42
Figura S 2. Litoarenitas. ....	42
Figura S 3. Litoarenitas feldespáticas. ....	43
Figura S 4. Cuarzoarenitas. ....	43
Figura S 5. Lodolitas. ....	43
Figura S 6. Granodioritas. ....	44
Figura S 7. Andesitas porfídicas. ....	44
Figura S 8. Esquistos moscovíticos.....	45
Figura S 9. Esquistos verdes. ....	45
Figura S 10. Categorización PGA.....	46
Figura S 11. Temperatura máxima, mínima y promedio de Titiribí. Tomado de: <a href="http://www.weatherspark.com">www.weatherspark.com</a> . ....	46
Figura S 12. Área de explanación para construcciones en la zona. ....	47

### **Lista de anexo de tablas**

Tabla S 1. Tipos de drenaje ácido (Skousen & Ziemkiewics, 1996). ....	47
Tabla S 2. Esquema de meteorización según Deere & Patton, (1971).....	48
Tabla S 3. Mineralogía y clasificación de las rocas sedimentarias. ....	48
Tabla S 4. Mineralogía y clasificación de las rocas ígneas.....	48
Tabla S 5. Mineralogía y clasificación de las rocas metamórficas. ....	48
Tabla S 6. Clasificación de pendientes según Regmi et al. (2010). ....	49

## **Resumen**

El fenómeno de generación de drenaje ácido de roca (DAR) ocurre de forma natural a partir, principalmente, de la exposición y oxidación de minerales sulfurados a la intemperie, con la posterior generación de drenajes ácidos y lixiviación de metales pesados asociados. El DAR depende del tiempo e involucra oxidación química y biológica, que traen efectos a nivel fisicoquímico. En el suroccidente antioqueño se encuentra el municipio de Titiribí, una zona con la presencia de ambientes geológicos que permitieron la ocurrencia de varias tipologías litológicas (rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias), así como de depósitos minerales como la presencia de carbones. Como consecuencia, se cuenta con volúmenes de rocas de diferentes composiciones expuestas al medio natural que pueden presentar comportamientos geoquímicos asociados a la generación potencial de acidez, las cuales pueden ser intensificadas debido a las condiciones de clima tropical de la zona (temperatura, humedad y lluvia). En esta investigación se obtienen resultados asociados a la caracterización del potencial de generación de acidez (PGA) de las diferentes litologías aflorantes y su posible generación y afectación en los sistemas hidrológicos e hidrogeológicos en el medio ambiente.

**Palabras clave:** sulfuros, oxidación, medio ambiente.

## **Abstract**

The phenomenon of acid rock drainage (ARD) occurs naturally, mainly from the exposure and oxidation of sulfide minerals in the environment, with the subsequent generation of acid drainage and leaching of associated heavy metals. ARD is time-dependent and involves chemical and biological oxidation, which have effects at a physicochemical level. The municipality of Titiribí is located in southwestern Antioquia, an area with the presence of geological environments that allowed the occurrence of several lithological typologies (igneous, metamorphic and sedimentary rocks), as well as mineral deposits such as the presence of coals. Consequently, there are volumes of rocks of different compositions exposed to the natural environment that can present geochemical behaviors associated to the potential generation of acidity (PGA), which can be intensified due to the tropical climate conditions of the area (temperature, humidity, and rainfall). In this research, results associated with the characterization of the acidity generation potential (PGA) of the different outcropping lithologies and its possible generation and affectation in the hydrological and hydrogeological systems in the environment are obtained.

**Key words:** sulfides, oxidation, environment.

## 1. Introducción

El drenaje ácido es considerado por las Naciones Unidas como uno de los problemas ambientales más desafiantes que enfrentará la sociedad en los próximos años (Qian & Li, 2019). Este es el resultado de la meteorización química y bioquímica de ciertos minerales en rocas que contienen sulfuro bajo agua y ambientes ricos en oxígeno (Nordstrom, 2011a). La interacción de sulfuros como pirita ( $\text{FeS}_2$ ) con oxígeno y agua, da como resultado la formación de ácido sulfúrico que ataca las rocas, disolviendo Fe, Al y otros elementos menores (Nordstrom & Alpers, 1999; Bigham & Nordstrom, 2000) entre ellos metales pesados. Por lo tanto, las aguas ácidas enriquecidas con metales pueden causar una degradación severa de las masas de agua y daños a los ecosistemas (Nordstrom, 2011a; Nordstrom, 2011b; Talukdar et al., 2016). Además de los solutos, los metales también forman precipitados. Por ejemplo, el Aluminio, que es un componente principal de varios minerales de silicato comunes, generalmente precipita a un pH > 4,5-5,6 en forma de hidróxidos e hidroxisulfatos de aluminio (AHP) de color blanquecino (Bigham & Nordstrom, 2000; Gault et al., 2015).

Los drenajes ácidos asociados a diferentes mineralogías presentes en las rocas comúnmente son potencializados por actividades vinculadas a la industria minera (drenaje ácido de mina, DAM) (Nordstrom, 2009). Sin embargo, también pueden ocurrir en cuencas sedimentarias no explotadas ricas en sulfuros bajo condiciones naturales específicas (drenaje ácido de roca, DAR) (Nordstrom & Alpers, 1999). Aunque el estudio de DAM se ha abordado ampliamente en la literatura (por ejemplo, Plaza et al., 2017; Qian y Li, 2019; Rezaie y Anderson, 2020), la investigación que trata el fenómeno DAR y los impactos asociados es mucho más limitada (por ejemplo, Kwong et al., 2009; Todd et al., 2012; Ilyashuk et al., 2014). Algunas observaciones realizadas durante las últimas décadas sugieren que el cambio climático está promoviendo un aumento de algunos solutos en agua en áreas montañosas con mineralización de sulfuros metálicos (Manning et al., 2013), donde el DAR es el principal mecanismo natural para el enriquecimiento de metales en las aguas. Asimismo, se afirma que las condiciones más cálidas y secas inducidas por el cambio climático son las posibles causas del deterioro significativo de la calidad de los ríos y las aguas subterráneas en la región. Este problema también se ha

documentado en zonas montañosas del mundo, como el Territorio de Yukon (Canadá) (Gault et al., 2015); el Himalaya (Salerno et al., 2016); o los Alpes europeos (Ilyashuk et al., 2014).

En Colombia se han presentado y detectado DAM principalmente en las explotaciones de carbón y oro, en los yacimientos que actualmente son explotados en los departamentos del Cesar y la Guajira (Peña & Pérez, 2009). Adicionalmente, se tiene registro de manifestaciones de drenaje ácido en la mina de esmeraldas Divino Niño en Quípama-Boyacá, donde se encontró una transformación física, química y biológica de los drenajes al interior de la mina, provocando acidificación en las aguas (Nieves & Solano, 2017). Sin embargo, no se tienen estudios detallados sobre este tema en la zona de estudio, así como se desconocen los autores de muchos de los casos de DAM, debido a los altos porcentajes de explotaciones mineras ilegales en Colombia, lo cual genera una incógnita sobre quién debe asumir esta obligación ambiental (Arismendy, 2020).

Con base en lo anterior, este proyecto se desarrolla con el fin de analizar la posible ocurrencia de drenajes ácidos de roca (DAR) en las diferentes formaciones geológicas que afloran en la zona oriental del Municipio de Titiribí, debido a que éste cuenta con las condiciones climáticas (temperatura y precipitación) para que los minerales con potencial de generación de acidez se oxiden. Esto se realiza partiendo la caracterización y análisis mineralógicos detallados de muestras representativas de los diferentes litotipos recolectados en campo para conocer su comportamiento geo-ambiental en la zona de estudio, planteando estrategias que permitan prevenir y mitigar el potencial de este posible fenómeno en la zona.

## **2. Generalidades**

### **2.1 Pregunta de investigación**

¿Los materiales geológicos presentes en la zona oriental del municipio de Titiribí presentan características mineralógicas que potencialmente pueden generar drenaje ácido de roca al ser expuestas a un ambiente oxidante?

### **2.2 Hipótesis**

La oxidación natural de minerales de sulfuro (pirita, calcopirita, etc.) a minerales como jarosita, goethita y hematita en los materiales geológicos presentes en la zona oriental del

municipio de Titiribí, tienen el potencial de generar drenajes pacidos y lixiviación de metales pesados.

Para que esta hipótesis sea verídica, se deben cumplir 3 predicciones. De lo contrario, se estima que no hay drenajes ácidos de roca en la zona. Estas son:

- Ocurrencia de minerales de sulfuro en la zona de estudio.
- Condiciones climáticas que favorezcan la oxidación de estos minerales.
- No debe haber presencia de drenajes alcalinos que neutralicen los ácidos.

## **2.3 Objetivos**

### **2.3.1 Objetivo general**

Evaluar el potencial de generación de acidez en los materiales geológicos presentes en la zona oriental del municipio de Titiribí, Antioquia.

### **2.3.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar mineralógicamente muestras representativas de las diferentes litologías de la zona de estudio y clasificarlas de acuerdo con su contenido de minerales de sulfuros.
- Describir los modelos de perfiles de meteorización con base en la elaboración de una columna estratigráfica y los afloramientos tipo.
- Evaluar la presencia de factores detonantes naturales o antrópicos asociados a la generación de DAR en la zona.
- Establecer conceptualmente la posible afectación a los cuerpos de agua superficiales cercanos a los puntos catalogados como con potencial de generación de acidez.
- Postular recomendaciones de medidas de prevención, control y mitigación para los posibles impactos que se pueden derivar del desarrollo del DAR.

### 3. Zona de estudio

#### 3.1 Localización

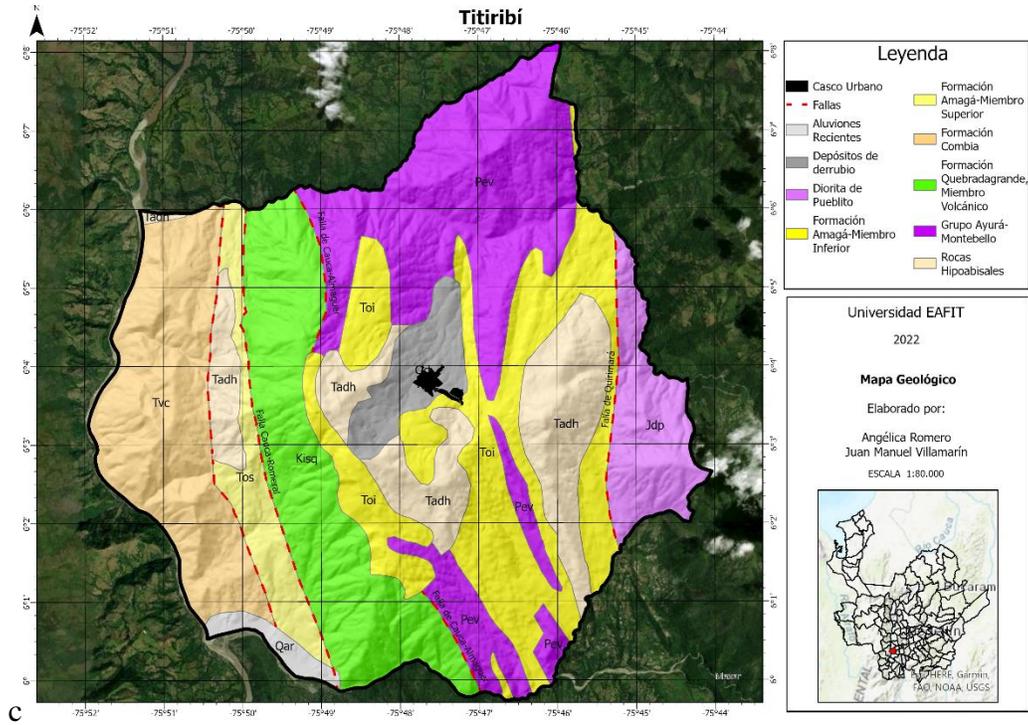


Figura 1. Ubicación y geología de la zona de estudio.

El municipio de Titiribí se encuentra en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia, en el departamento de Antioquia, al suroeste de Medellín. Al norte limita con los municipios de Armenia y Angelópolis, al este con Angelópolis y Amagá, al sur con Venecia y al oeste con el municipio de Concordia (Figura 1).

#### 3.2 Clima

Titiribí cuenta con dos tipos de climas: cálido y templado. El primero predomina en las cuencas del Cauca, Sinifaná y Amagá, mientras que el segundo en la parte urbana, laderas y las partes altas de las montañas. Su temperatura promedio es de 26 °C.

#### 3.3 Geología regional

Regionalmente se encuentran rocas que van desde el Paleozoico hasta el Terciario tardío y depósitos Cuaternarios (Sierra et al., 2003). Las rocas más antiguas de edad Paleozoica pertenecen al Complejo Polimetamórfico (Grupo Ayurá-Montebello) de la Cordillera

Central (Restrepo & Touissaint, 1987) que afloran hacia el norte de la zona de estudio. Estas están conformadas por metasedimentos y anfibolitas de probable edad paleozoica (Guzmán, 2007). En el Triásico se presenta el Stock de Amagá que aflora en los alrededores del municipio de Amagá, que corresponde a un cuerpo intrusivo de composición intermedia-ácida (Vinasco et al., 2006). Contiguo a este y de edad Jurásica se encuentra la Diorita de Pueblito, descrita y nombrada así por González (1976). La Formación Quebradagrande aflora al noroeste y este de la zona de estudio, su miembro sedimentario y volcánico respectivamente, donde González (1980) y Gómez et al. (1995), de acuerdo con los fósiles recolectados en estas rocas, determinan que se formaron durante el intervalo Valanginiano-Albiano, confirmando su edad Cretácica inferior. Igualmente, dentro del Cretácico, también está presente una formación que fue definida por Álvarez y González (1978) como Formación Barroso, que corresponde a una unidad volcano sedimentaria heterogénea que forma una franja alargada en dirección N-S. Estas dos últimas unidades están relacionadas con un arco de islas que colisionó con el Occidente colombiano durante el Cretácico tardío (González, 2001. Citado por Henao, 2012). Probablemente a este evento y al magmatismo ocurrido durante el Cretácico se encuentra asociado el Batolito Antioqueño, ubicado al norte de la zona de estudio (Henao, 2012).

Por último, de edad Terciaria, se encuentra la Formación Amagá, compuesta por rocas sedimentarias dividida por Sierra. (2001) en dos miembros: superior e Inferior de acuerdo con el contenido de carbón explotable. También se encuentra la Formación Combia, que está conformada por rocas volcanoclásticas que suprayacen discordantemente a la Formación Amagá en el Suroccidente de Antioquia (Grosse, 1926). Se divide en dos miembros: miembro inferior de carácter volcánico y miembro superior de carácter volcanoclástico (Grosse, 1926; González, 1976).

### **3.4 Geología local**

El municipio de Titiribí presenta una variabilidad de litotipos (Figura 1). Se encuentran rocas metamórficas del Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central, rocas sedimentarias de la Formación Amagá, rocas ígneas intrusivas como la Diorita de Pueblito, y rocas porfiríticas como el Concorvado y Cerro La Candela (CORANTIOQUIA, 2005).

### **3.4.1 Diorita de Pueblito**

Roca fanerítica de grano fino a medio con cristales euhedrales de feldespato. Está compuesta por anfíbol, feldespato, cuarzo y ocasionalmente piroxeno y como minerales accesorios presenta minerales opacos, apatito, circón y esfena (Flórez & Valencia, 2006). Cuenta con una dirección aproximada N-S y se encuentra limitado por la Falla Quirimará, la cual lo separa al norte y centro de los Esquistos de Sabaleta y del Gabro de Heliconia y hacia del sur de las rocas sedimentarias de la Formación Amagá (Flórez & Valencia, 2006). Esta unidad ha sido considerada parte del Complejo Ofiolítico del Cauca (Restrepo & Touissaint, 1974) y según Vinasco et al. (2003), tiene una edad de 238 Ma.

### **3.4.2 Formación Amagá**

Fue definida inicialmente por Grosse (1926), quien la denominó la unidad “Terciario carbonífero de Antioquia” y la subdividió en tres pisos de acuerdo con la presencia o ausencia de carbón explotable. Además, le asignó una edad terciaria debido a la presencia de moluscos encontrados en Fredonia y Amagá. Sin embargo, Van der Hammen (1958) le asignó una edad Oligoceno Superior- Mioceno Inferior, mediante una correlación palinológica de polen y esporas. Posteriormente, González (1980), nombra a este conjunto sedimentario como la Formación Amagá y propone una subdivisión en miembro inferior, medio y superior. Por último, Sierra (2001) subdivide esta formación en dos miembros (superior e inferior) de acuerdo con las asociaciones de facies que se presentan y sus características petrográficas.

Esta formación es una sucesión siliciclástica de origen continental: conglomerados, areniscas, lodolitas y mantos de carbón (CORANTIOQUIA, 2005) que aflora en una serie de cuencas sedimentarias dispuestas en sentido aproximado N-S siguiendo la orientación general del Sistema de Fallas Cauca-Romeral (Guzmán, 2007). Fue depositada en el Terciario y posteriormente intruida por pórfidos andesíticos a finales del Mioceno (Blauco & Salazar, 1994). En el Neógeno, la secuencia fue afectada por la Orogenia Andina, la cual le imprime su configuración actual en los Andes colombianos (Blauco & Salazar, 1994. Citado por CORANTIOQUIA, 2005).

### **3.4.3 Formación Combia**

La Formación Combia es denominada por Grosse (1926) como Estratos de Combia y la divide en dos miembros, Neoterciario Volcánico y Neoterciario Sedimentario (Mahecha, H. et al., 2006). Posteriormente, Calle et al. (1980) los denominan informalmente como Miembro volcánico y Miembro sedimentario de la Formación Combia. El primero se compone esencialmente por conglomerados con matriz tobácea, areniscas y tobas y el segundo por conglomerados, areniscas de grano fino a medio y arcillolitas que se superponen a los distintos miembros de la Formación Amagá (INGEOMINAS, 1980)

La edad de esta formación no ha sido determinada directamente, pero las relaciones de campo y la correlación con otras unidades indican una edad Mioceno Superior-Plioceno (INGEOMINAS, 1980).

### **3.4.4 Formación Quebradagrande**

González (2001) define este complejo como la unidad que agrupa rocas volcánicas y sedimentarias que afloran como una franja larga y estrecha en el flanco oeste de la Cordillera Central, al occidente de la Falla San Jerónimo y al este de la Falla Silvia-Pijao. Las rocas sedimentarias son de origen marino (lodolitas, arenitas arcósicas, cuarzoarenitas, cherts y conglomerados) y las rocas volcánicas son tobas, andesitas, basaltos y fragmentos de corteza oceánica (gabros, basaltos y diabasas) (Moreno et al., 2008; Villagómez et al., 2011; Rodríguez & Zapata, 2013 en Rodríguez & Cetina, 2016).

Se encuentra limitado al E por la Falla San Jerónimo que lo separa del Complejo Cajamarca, y al W por la Falla Silvia-Pijao, que lo separa del Complejo Arquía (Rodríguez & Cetina, 2016) y según los fósiles presentes, su edad es del Berriasiano-Albiano.

### **3.4.5 Grupo Ayurá-Montebello**

Según Botero (1963), este grupo está compuesto por rocas metamórficas, principalmente metasedimentarias. También reporta la presencia de neises, micacitas, filitas grafitosas, esquistos cloríticos, cuarcitas y lentes de mármol. Le

asigna una edad precretácea con base en la relación discordante entre las filitas del grupo y la Formación Abejorral.

Posteriormente, Echeverría (1973) propone dividirlo en dos zonas de acuerdo con el tipo de metamorfismo: la zona de Ayurá comprende neises y esquistos biotíticos afectados por un metamorfismo de alto grado y la zona Montebello con un protolito sedimentario principalmente, compuesto por esquistos y cuarcitas sometidos a un metamorfismo de bajo grado.

Cabe resaltar que Restrepo & Touissaint (1984) propusieron reemplazar dicho nombre por el de Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central, representando materiales del Precámbrico.

#### **3.4.6 Rocas hipoabisales**

Corresponden a cuerpos de rocas porfiríticas, de composición variable entre andesitas y dacitas (González, 1980). Según Scheibe (1919), su composición corresponde a la de un pórfido dacítico gradando a cuarzodiorita porfirítica.

Los pórfidos dacíticos son rocas de color gris medio a claro con fenocristales de plagioclasa, cuarzo y hornblenda embebidos en una matriz microcristalina feldespática (González, 1980). Por otra parte, los pórfidos andesíticos muestran gran variedad composicional y textural (González, 1980).

### **3.5 Geomorfología**

El municipio de Titiribí cuenta con geoformas muy variadas. En general, se presenta un relieve montañoso y escarpado en el cual resaltan cuchillas alargadas, cerros aislados, laderas alargadas, zonas de pendientes bajas y depresiones (CORANTIOQUIA, 2005). Al extremo occidental domina el relieve representado por la morfología del flanco oriental del Valle medio del río Cauca, definido por un cañón profundo con un escarpe erosivo elevado (CORANTIOQUIA, 2000).

Adicionalmente, se presentan valles amplios, principalmente asociados al río Cauca y a las quebradas Amagá y Sinifaná y la quebrada La Horcona y las rocas ígneas y metamórficas predominan en las laderas altas, mientras que las rocas sedimentarias ocupan las zonas bajas (CORANTIOQUIA, 2005).

La geomorfología es un factor relevante en el tema debido a que el desarrollo de perfiles de meteorización está íntimamente relacionado con la composición mineralógica presente en el material geológico expuesto, lo cual incide en el tipo de geoformas que pueden desarrollarse, siendo evidente la relación entre relieves montañosos y escarpados asociado a las rocas ígneas y metamórficas, y de baja pendiente en rocas sedimentarias. Los perfiles de meteorización en zonas de alta pendiente son susceptibles a la generación de movimientos de remoción en masa, dejando muchas veces expuesta la roca fresca y, por ende, susceptible a procesos de oxidación y potencial de generación de acidez.

### **3.6 Hidrografía**

El municipio de Titiribí pertenece a la cuenca hidrográfica del río Cauca. Está rodeado por dos subcuencas importantes: quebrada Sinifaná al norte y Amagá al sur. Estas subcuencas tienen un control estructural debido a la influencia del sistema de Fallas Cauca-Romeral y presentan una red de drenaje paralela y subparalela (CORANTIOQUIA, 2005).

Conocer la hidrografía del municipio de Titiribí es importante porque en conjunto con las pendientes de la zona, permite identificar posibles puntos vulnerables cercanos a las cuencas hidrográficas que se pueden ver afectados por la ocurrencia de este fenómeno.

#### **3.6.1 Cuenca del río Cauca**

Esta cuenca tiene un área aproximada de 29 km<sup>2</sup> y sirve de límite con el municipio de Concordia en una extensión de 11 km entre las desembocaduras de las quebradas Amagá y Sinifaná (AASSA, 2008). Los procesos erosivos más significativos del municipio de Titiribí tienen lugar en las épocas de invierno entre las quebradas Campana y La Sucia, que presentan pendientes muy fuertes y, por lo tanto, favorecen la generación de avenidas torrenciales (CORANTIOQUIA, 2005; AASSA, 2008).

#### **3.6.2 Subcuenca quebrada Sinifaná**

Pertenece a la Cuenca del Río Cauca y se encuentra al suroeste de Antioquia. Cuenta con un área aproximada de 44 km<sup>2</sup>, una pendiente media de 7,9 % y limita con el municipio de Venecia en un trayecto de 10 km (AASSA, 2008). A esta quebrada desembocan corrientes importantes de los municipios de Amagá, Titiribí, Caldas,

Venecia y Fredonia (CORANTIOQUIA, 2007). Cabe resaltar que en esta subcuenca se ubican explotaciones de carbón y material de playa (AASSA, 2008).

### **3.6.3 Subcuenca quebrada Amagá**

Tiene un área aproximada de 67 km<sup>2</sup> y es un límite entre los municipios de Amagá y Angelópolis en un trayecto de 21 km (CORANTIOQUIA 2005; AASA, 2008). La parte occidental es rica en oro y metales preciosos y la oriental en carbones y arcillas (CORANTIOQUIA, 2005).

## **4. Marco conceptual**

### **4.1 Meteorización**

Es definida como el proceso de alteración y separación de la roca y materiales del suelo sobre y cerca de la superficie de la tierra por descomposición química o desintegración física (Anon, 1995). La susceptibilidad de la roca a procesos de meteorización química es función de la mineralogía, textura y presencia de fracturas, aumentando cuando el tamaño del grano es más fino. Sin embargo, se considera que el control dominante en el modo de meteorización es la lluvia y la temperatura, al igual que el rápido cambio de dichas variables durante el día (Ollier, 1984). Es por esto por lo que masas rocosas en ambientes tropicales húmedos se caracterizan por la generación de profundos perfiles de meteorización, en algunos casos con horizontes superficiales enriquecidos en óxidos de hierro y aluminio conocidos como lateríticos (Aristizábal et al., 2011).

#### **4.1.1 Perfil de meteorización**

Los suelos residuales son característicos en diversas regiones del mundo y principalmente constituyen la mayor cobertura en zonas tropicales (Bogado & Francisca, 2017). Gran variedad de autores han clasificado las rocas meteorizadas (Por ejemplo, Moye (1995), Ruxton & Berry (1957), Little (1969) y Deere & Patton (1971). A modo general, un perfil básico de meteorización lo conforman: a) horizontes móviles; b) roca totalmente meteorizada; c) roca meteorizada parcialmente y d) roca fresca (Aristizábal et al., 2011).

## 4.2 Drenaje ácido

El drenaje ácido de roca (DAR) se forma por la oxidación natural de minerales sulfurosos cuando son expuestos a la intemperie, lo que ocasiona que el oxígeno y/o el agua oxiden al azufre a una tasa mayor de lo que se reduce, promoviendo la movilización de azufre y de los metales que formaban parte del mineral (Peppas et al., 2000; Moreno, 2014). Las actividades que involucran la excavación de rocas con minerales sulfurosos, tales como minería de metal y carbón, aceleran el proceso (Akcil & Koldas, 2006). El drenaje resultante del proceso de oxidación puede ser de neutro a ácido, con o sin metales pesados disueltos, pero siempre con contenido de sulfatos.

Según (Barón, 2013) las características principales de los DAR son valores bajos de pH (entre 2 y 5), altos contenidos de sulfatos (varios miles de mg/L), hierro (entre 50 y 1000 mg/L), zinc (hasta 200 mg/L), manganeso (entre 1 y 100 mg/L), aluminio, plomo, cobre, níquel, mercurio, cadmio, cromo y otros elementos tóxicos como el arsénico y concentraciones elevadas de calcio y magnesio.

El proceso de oxidación de sulfuros y la formación del DAR es muy complejo e involucra a una multitud de procesos químicos y biológicos que pueden variar significativamente dependiendo de las condiciones ambientales, geológicas y climáticas (Nordstrom & Alpers, 1999). Los minerales sulfurosos en los depósitos minerales se forman bajo condiciones reductoras en la ausencia de oxígeno. Cuando se exponen al oxígeno atmosférico o a aguas oxigenadas como consecuencia de la exposición del material a la intemperie o actividades antrópicas como la minería, procesamiento del mineral, excavación u otros procesos de movimiento de tierras, los minerales sulfurosos pueden volverse inestables y oxidarse.

La Figura 2 presenta las diferentes etapas de formación de aguas ácidas de manera esquemática. Estas son:

**Etapas 1:** es la etapa de mayor duración, donde se da inicio al proceso de oxidación de los sulfuros a una velocidad baja. Este lapso para la generación de ácido es un factor importante para la prevención del DAR, ya que es más efectivo y menos costoso controlar su generación en etapas tempranas debido a que, por lo general, la alcalinidad disponible es suficiente para neutralizar parcialmente la acidez producida.

La primera reacción de la Figura 2 muestra la ecuación base para la oxidación de la pirita, en la cual los sulfuros reaccionan con el oxígeno y el agua para formar sulfato (sales), hierro ferroso e iones de hidrógeno libres.

**Etapa 2:** en esta etapa la acidez acumulada supera la capacidad de neutralización del medio y el pH empieza a descender por debajo de 4.5. Allí interviene un factor biológico importante que son bacterias como el *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que derivan su energía metabólica de la oxidación ferrosa a hierro férrico y pueden acelerar la velocidad de reacción por muchos ordenes de magnitud respecto a los índices abióticos (Nordstrom, 2003).

Posteriormente, aparece la segunda reacción de la Figura 2, que muestra la reacción del hierro ferroso con el oxígeno para formar hierro férrico. Este último hace que la oxidación sea más rápida y se genere más acidez.

Por lo general, a  $\text{pH} < 3.5$  el ion férrico por hidrólisis precipita como hidróxido de hierro, que es lo que le da la coloración amarilla rojiza al agua y provoca un descenso del pH.

**Etapa 3:** la última etapa inicia cuando el pH es menor a 3. Allí las bacterias se hacen dominantes y oxidan el ion ferroso a férrico, produciendo más ácido

Es importante mencionar que algunos cationes férricos que no precipitan en la solución pueden servir como oxidantes reemplazando al oxígeno y ayudando a catalizar la oxidación de la pirita para formar nuevamente iones ferrosos, sulfato e hidrogeno. De esta forma pasamos de tener 2 iones libres de hidrógeno en la primera ecuación a 16, un incremento de 8 veces por cada reacción.

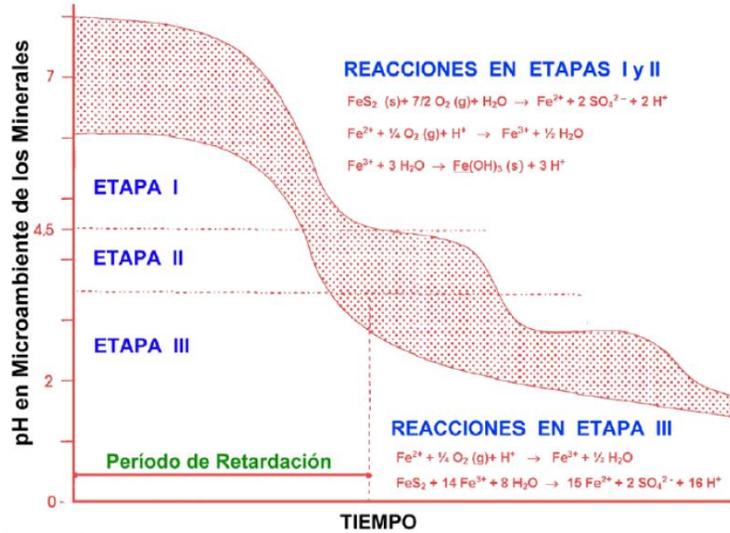


Figura 2. Etapas de formación drenajes ácidos (INAP, 2009).

Aunque la pirita es por mucho el sulfuro dominante responsable de la generación de acidez, diferentes depósitos minerales contienen varios tipos de minerales de sulfuro. Sin embargo, no todos generan acidez cuando se oxidan. Como regla general, los sulfuros de hierro (pirita, marcasita, pirrotita) y sulfosales (ejm.: enargita) generan ácido cuando reaccionan con el oxígeno y agua. Los sulfuros con proporción metal/sulfuro = 1 (ejm.: esfalerita, galena, calcopirita) tienden a no producir acidez cuando el oxígeno es el oxidante. Por ello, la generación potencial de ácido de un depósito mineral o un desecho de mina generalmente depende de la cantidad de sulfuro de hierro presente.

Skousen et al. (1994 y 1998) y Ziemkiewics et al. (1997) a partir del pH y el contenido de oxígeno y metales pesados hacen una clasificación de los drenajes de mina y lo agrupan en 5 tipos, que se muestran en la Tabla S1.

## 5. Métodos

Para lograr los objetivos propuestos, se utilizaron métodos basados en fases secuenciales que permitieron un análisis sistemático y coherente de la información. Éstos se resumen en la Figura 3.

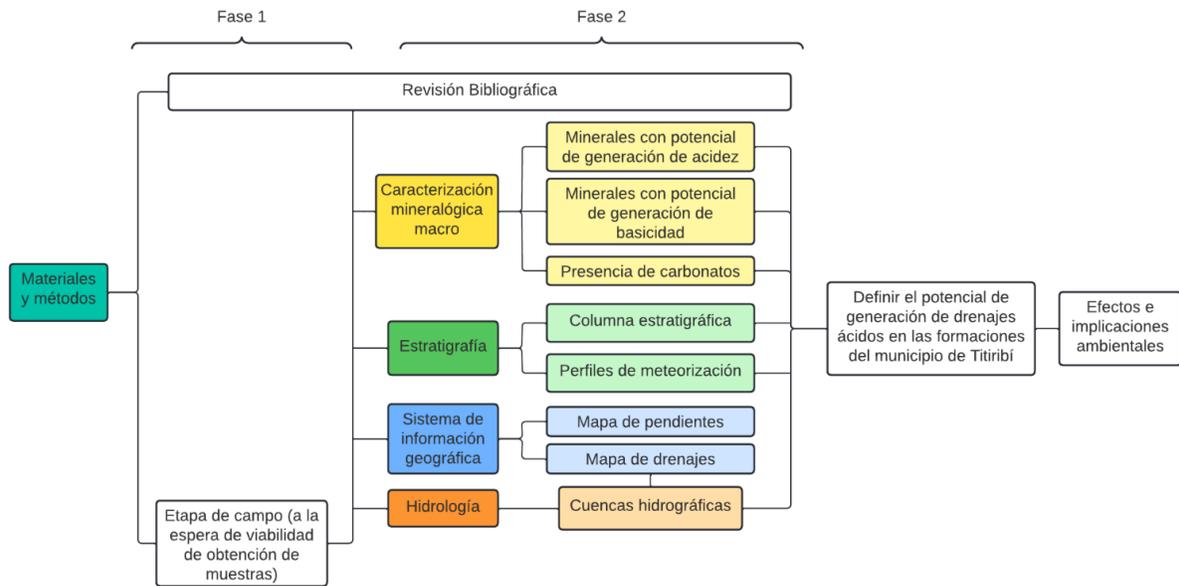


Figura 3. Materiales y métodos.

## 5.1 Fase 1

### 5.1.1 Revisión bibliográfica

Se aplicó un método descriptivo basado en la revisión de diferentes elementos geológicos, en la cual se recopiló información tectónica, petrográfica, hidrogeológica y mineralógica, con el fin de analizar y obtener un panorama generalizado de la zona de estudio y así evaluar el potencial de generación de los drenajes ácidos y su impacto en el medio ambiente.

### 5.1.2 Etapa de campo

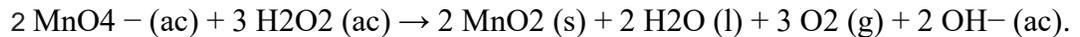
Se realizaron dos salidas de campo donde se recolectaron 20 muestras a lo largo de la vía Medellín-Titiribí y Medellín-Bolombolo.

## Fase 2

### 5.1.3 Caracterización mineralógica

Una vez obtenidas las muestras de la zona de estudio, se realizaron pruebas de ácido clorhídrico (HCl) y peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) para ver su reacción y evidenciar la ocurrencia de carbonatos o pirolusita, respectivamente. Cabe resaltar que el análisis por (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) es un indicador de la presencia de óxidos de manganeso e

intemperismo en las muestras y se logra determinar si estas reaccionan al contacto con el ácido. Esto ocurre mediante la siguiente reacción:



Luego, las macro muestras fueron llevadas al estereoscopio para un análisis inicial. Posteriormente, las muestras fueron trituradas y tamizadas en mallas 50, 100 y 200 para realizar una caracterización mineralógica detallada de cada una de ellas en estereoscopio. Allí se realizó una clasificación mineralógica según el Manual de mineralogía de Dana (1981), y se analizaron parámetros como alteraciones hidrotermales, procesos de argilización por intemperismo, textura, granulometría, estructuras (foliación), selección, porcentaje de matriz, redondez, entre otros, para poder definir la ocurrencia de minerales con potencial de generación de acidez en la zona oriental del municipio de Titiribí.

#### **5.1.4 Diagramas Deere & Patton**

Con el fin de hacer una clasificación de las rocas meteorizadas, Deere & Patton (1971) proponen un perfil típico para suelos tropicales (Tabla S2), con límites entre horizontes generalmente no muy claros. Dividen el perfil en tres horizontes principales, suelo residual (I), roca meteorizada (II) y roca no meteorizada (III).

#### **5.1.5 Sistemas de información geográfica (ArcGis)**

Se realizó una serie de mapas (geológico, pendientes y drenajes) con el fin de determinar la distribución espacial de las muestras con y sin potencial de acidez y su posible alcance dentro del área de estudio.

#### **5.1.6 Hidrología**

Con la información recopilada de diferentes fuentes bibliográficas (IDEAM y CORANTIOQUIA) sobre la presencia de elementos hídricos en la zona (ríos, acuíferos y otros cuerpos de agua), se realizó un análisis en el cual se establecieron las cuencas que pueden verse afectadas dada la eventual ocurrencia de DAR en la zona y su impacto potencial a partir del análisis de potencial de generación de acidez (PGA).

## 6. Resultados

Para plantear los resultados de este estudio se hace necesario hacer énfasis en las herramientas y métodos utilizados, que se resumen en la Figura S1 y que fueron explicados anteriormente en la metodología. En general, se encontraron 10 muestras sedimentarias, 6 rocas ígneas y 4 rocas metamórficas que serán explicadas en detalle a continuación.

### 6.1 Rocas sedimentarias (Formación Amagá)

En síntesis, se tienen rocas de tipo arenisca y lodolitas (Tabla S3). Las areniscas analizadas fueron clasificadas composicionalmente en el diagrama ternario QFL (Cuarzo, feldespato y líticos) según Folk (1974) como litoarenitas, litoarenitas feldespáticas y sublitoarenitas (Figura 4). En promedio, se encontró aproximadamente un 10% de sulfuros en las muestras provenientes, posiblemente, de un ambiente reductor.

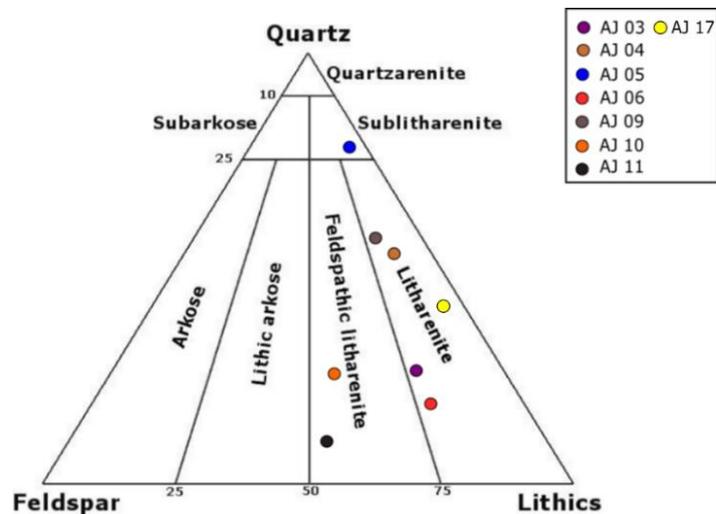


Figura 4. Diagrama ternario de clasificación QFL (Cuarzo, feldespato y líticos). Tomado y modificado de Folk (1974).

Las litoarenitas (Figura S2) presentan clastos moderadamente seleccionados con un tamaño de grano de fino a medio y formas angulares a sub-redondeadas. Además, cuentan con un porcentaje de matriz <15%.

En términos composicionales presentan cuarzo, moscovita y biotita como minerales más abundantes, seguido de óxidos y sulfatos como goethita, jarosita y, en menor cantidad hematita. Asimismo, cuentan con fragmentos líticos, posiblemente de origen ígneo y

sedimentario. Al aplicar peróxido de hidrógeno reaccionan algunas de ellas (Figura S2 a, S2 b y S2 d), indicando presencia de óxidos de manganeso (pirolusita) y a su vez, la muestra AJ 04 (Figura S2 b) presenta una reacción poco significativa al ácido clorhídrico (HCl), evidenciando la ocurrencia de carbonatos en pequeñas cantidades. Es importante mencionar que la muestra AJ 17 es la única que presenta oligisto, un óxido de hierro de color rojo intenso.

Por otra parte, las litoarenitas feldespáticas (Figura S3) presentan granos angulares y mal seleccionados de tamaño medio. Estas rocas reciben este nombre debido a que cuentan con una relación aproximada de 1:1 entre fragmentos líticos y feldespatos. Además, poseen un bajo contenido de cuarzo y ambas tienen una fuerte reacción al peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), lo cual, como se mencionó anteriormente, es un indicador de la presencia de pirolusita. Cabe resaltar que no cuentan con carbonatos y que la muestra AJ 11 (Figura S3 b) tiene vacuolas de desgasificación y hematita en poca cantidad, lo cual puede favorecer la infiltración de agua y con esto, la oxidación de los minerales.

Para finalizar el grupo de las areniscas, se encuentra la muestra AJ 05 (Figura S4), que corresponde a una cuarzoarenita con tamaño de grano medio-groeso y con clastos moderadamente seleccionados, subredondeados a angulares. Adicionalmente, cuenta con un porcentaje mayor al 75% de cuarzo, fragmentos líticos posiblemente de origen ígneo y abundantes óxidos como jarosita, goethita y hematita. Presenta pirolusita, carbonatos en poca cantidad, cuarzo, biotita, moscovita y materia orgánica.

Por otra parte, se encontraron dos lodolitas (Figura S5) que, debido a su tamaño de grano fino, se dificultó la identificación mineralógica, pues no es posible caracterizarla a detalle por el aumento que maneja el estereoscopio. Sin embargo, fue posible evidenciar algunos minerales como jarosita y moscovita y una veta de materia orgánica en la macro muestra AJ 01 (Figura S5 a), que corresponde a una lodolita abigarrada. Adicionalmente, debido a la reacción que presentó frente al ácido clorhídrico y peróxido de hidrógeno, es posible inferir la presencia tanto de carbonatos como de pirolusita. Por otra parte, la muestra AJ 02 (Figura S5 b) corresponde a una lodolita carbonosa fisil, una roca de grano fino con laminación paralela a la estratificación y con un alto contenido de materia orgánica. Cabe

resaltar que a nivel estereoscópico fue posible determinar la presencia de jarosita en poca cantidad.

## 6.2 Rocas ígneas (Diorita de pueblito y Rocas hipoabisales porfídicas)

En general, se encontraron 3 granodioritas y 3 pórfidos andesíticos (Tabla S4). Todas ellas se clasificaron en un diagrama QAP (Cuarzo, feldespato alcalino y plagioclasa) para rocas plutónicas, según Strenckeinsen (1972) (Figura 5) y para rocas volcánicas según Strenckeinsen (1979) (Figura 5) Adicionalmente, se realizaron pruebas de reacción al ácido clorhídrico y al peróxido de hidrógeno para evaluar la presencia de carbonatos y pirolusita, respectivamente. Para esta litología se encontró un promedio de sulfuros del orden del 5% que proviene, posiblemente, de fluidos hidrotermales, pero también se evidencia la ocurrencia de jarosita, que es un sulfato derivado de la oxidación de la pirita.

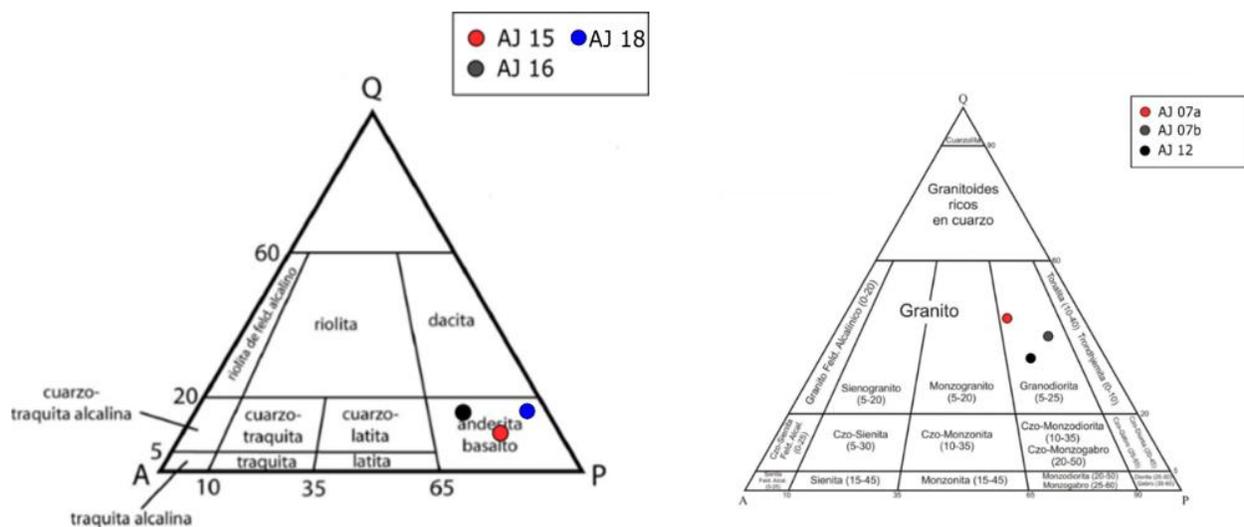


Figura 5. Diagramas de clasificación QAP para rocas plutónicas y volcánicas. Tomado y modificado de Strenckeinsen (1979 y 1972).

Las granodioritas (Figura S6) fueron clasificadas según el diagrama QAP para rocas plutónicas (Figura 5). Presentan plagioclasa, cuarzo, moscovita, biotita, jarosita, goethita y pirolusita en cantidades similares. Adicionalmente, la muestra AJ 12 (Figura S6 c) contiene vacuolas de desgasificación, pocos carbonatos y una cantidad moderada de pirita.

Asimismo, pese a que la muestra AJ 07B (Figura S6 b) fue tomada en el mismo lugar que la muestra AJ 07A, ésta presenta un tamaño de grano inferior.

Por último, las andesitas porfídicas (Figura S7) se encuentran en la zona oriental del municipio de Titiribí. Estas se caracterizan por presentar plagioclasa, moscovita, biotita, cuarzo y óxidos como jarosita y goethita. Adicionalmente, no presentan carbonatos, pero sí pirolusita en poca cantidad. Cabe resaltar que el carácter porfídico de estas muestras se debe a que los cristales están embebidos en una matriz microcristalina.

### **6.3 Rocas metamórficas (Grupo Ayurá-Montebello)**

Dentro de este grupo de muestras se encuentran 2 esquistos moscovíticos y 2 esquistos verdes (Tabla S5) que en promedio tienen un porcentaje de sulfuros del 7-8% provenientes, posiblemente del protolito o de fluidos metamórficos. Los esquistos moscovíticos (Figuras S8 a y S8 b) presentan moscovita como mineral principal y biotita, jarosita y goethita como minerales secundarios. Además, tienen procesos de cloritización y pirolusita en cantidades moderadas. Por otra parte, los esquistos verdes (Figuras S9 a y S9 b) presentan clorita y posiblemente epidota, además tienen moscovita, biotita, materia orgánica, jarosita y goethita, pero no pirolusita. Cabe resaltar que los esquistos moscovíticos han estado sujetos a procesos de meteorización intensos que se evidencian como mineralogía secundaria, la cual potencializa sus características estructurales como su alta fisibilidad.

### **6.4 Propuesta metodológica enfocada en determinar el potencial de acidez en cuencas hidrográficas**

La propuesta metodológica preliminar se realizó con base en criterios como la información de los puntos de muestreo tomados en campo y el posterior análisis estereoscópico de las muestras, los perfiles de meteorización levantados en campo, las pendientes y los drenajes de la zona.

La pendiente se entiende como el grado de inclinación desde el plano horizontal. Para definir las pendientes en el mapa de la zona de estudio, se utilizó la clasificación de Regmi et al. (2010) (Tabla S6). Con base en dicha información y el mapa de pendientes (Figura 6), es posible concluir que el 70% de la zona cuenta con pendientes entre 20 y 40°, 20% tiene pendientes que van desde >10°-20° y el 10% restante corresponde a pendientes mayores a 40%.

Posteriormente, se realizó una superposición de la red de drenajes, donde fue posible evidenciar un patrón de drenaje paralelo-subparalelo. A continuación, se superpusieron las estaciones de campo, ubicadas en la zona oriental del municipio de Titiribí, con el fin de establecer las relaciones espaciales entre los factores previamente mencionados y la posible potencialidad de ocurrencia de DAR en la zona. Finalmente, éstas se subdividieron dependiendo del tipo de roca, y se realizó una simbología para el potencial de generación de acidez (PGA) como se evidencia en la leyenda del mapa (Figura 6).

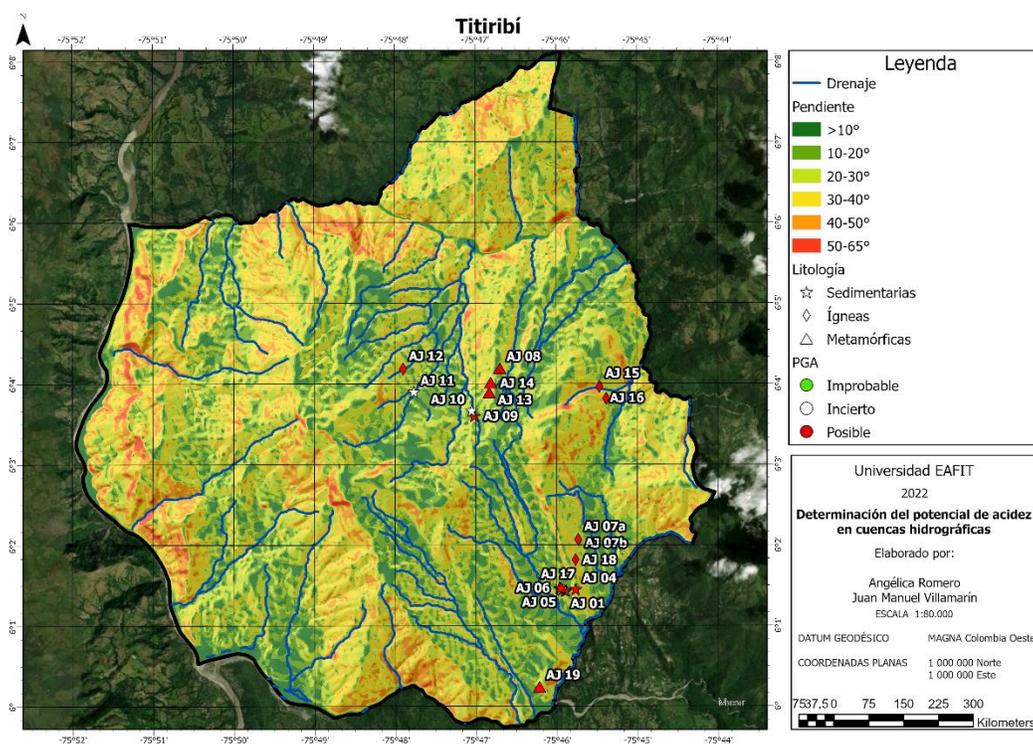


Figura 6. Determinación de potencial de acidez en cuencas hidrográficas.

### 6.5 Columna estratigráfica de la Formación Amagá

Se realizó un levantamiento de una columna estratigráfica sobre la vía que comunica el municipio de Titiribí con Bolombolo (Figura 7), en las coordenadas 6° 01' 24,7'' N- 75° 45' 53'' W, sobre las rocas sedimentarias de la Formación Amagá para caracterizar, de manera preliminar y cualitativa, el potencial de generación de acidez.

En general, el afloramiento mide 11 m de altura y 20 m de ancho con 14 capas que tienen litologías desde lodolitas orgánicas fósiles a conglomerados. Se presenta estratificación plano-paralela, sin fósiles aparentes, contactos tanto erosivos como concordantes y con

intercalaciones de materia orgánica y bandas de óxidos (hematita y goethita) en algunos niveles. Adicionalmente, se encontró jarosita diseminada en la superficie de un nivel arcilloso. Todo esto es indicador de una mineralogía potencialmente generadora de acidez.

Además, en la columna se encuentran unos círculos amarillos y azules que fueron establecidos como capas con mineralogía potencial de generación de acidez, principalmente en las litoarenitas en color amarillo y en azul se encuentran niveles con carbonatos, que actúan como neutralizantes de acidez.

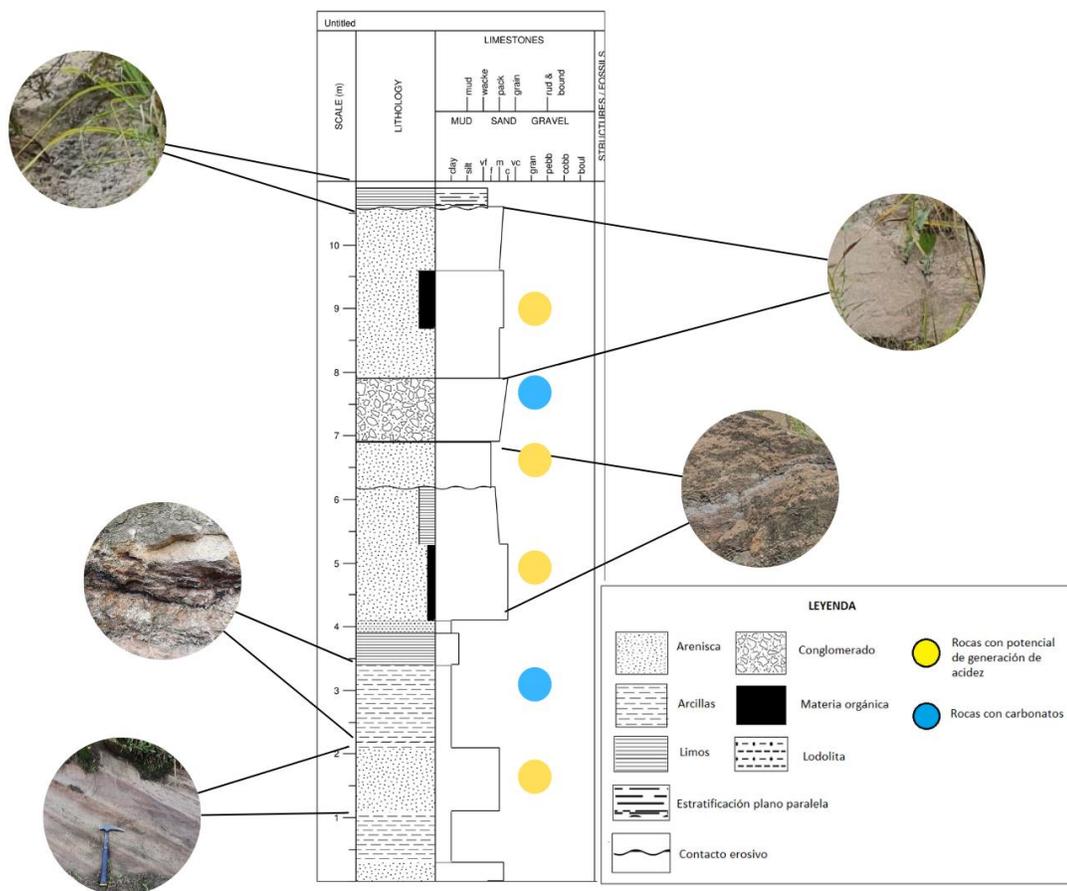


Figura 7. Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio.

### 6.6 Perfiles de meteorización

Se realizaron 3 esquemas de perfiles de meteorización (Figura 8) con base en la clasificación de Deere & Patton (1971) (Tabla S2), en los cuales se incluye: columna,

simbología, interpretación fotográfica y descripción según la geología de la zona, con el fin de corroborar la información obtenida en la columna y en el análisis mineralógico de las muestras de cada litología. Los perfiles estudiados se ubican al suroeste de Medellín, en la zona rural de Titiribí, vereda Sitio Viejo. La recopilación de información se realizó en taludes expuestos sobre la carretera y en diferentes construcciones de la zona y sirven de apoyo a la clasificación mineralógica expuesta en las Figuras S2-S9, indicando el material parental que no se logró observar en estos perfiles.

Con base en los resultados obtenidos fue posible determinar que estos perfiles actúan como aislantes de las condiciones oxidantes para la roca fresca debido a que predomina una mineralogía arcillosa que inhibe el paso de agua o del contacto directo con el oxígeno. También es importante mencionar que es evidente la total meteorización y posterior oxidación de los componentes originales obteniendo óxidos de hierro y manganeso e hidróxidos, por lo que las capas de los perfiles fueron catalogadas como suelos.

Las Figuras 8a y 8b muestran los dos primeros perfiles. Estos se tomaron en las coordenadas  $6^{\circ} 05' 19,9''$  N –  $75^{\circ} 47' 56,1''$ W. Cuentan con 3 y 4 capas, respectivamente. El tercer perfil (Figura 8c), fue realizado en las coordenadas  $6^{\circ} 05' 0,3''$  N-  $75^{\circ} 48' 17,6''$  W y cuenta con 3 capas en total. En general, el estado de meteorización en los 3 casos oscila entre I-A- II-A, con fuertes evidencias de la descomposición del material original y los efectos de meteorización química generados por cambios de temperatura y precipitaciones en la zona y física al estar expuestos a la intemperie.

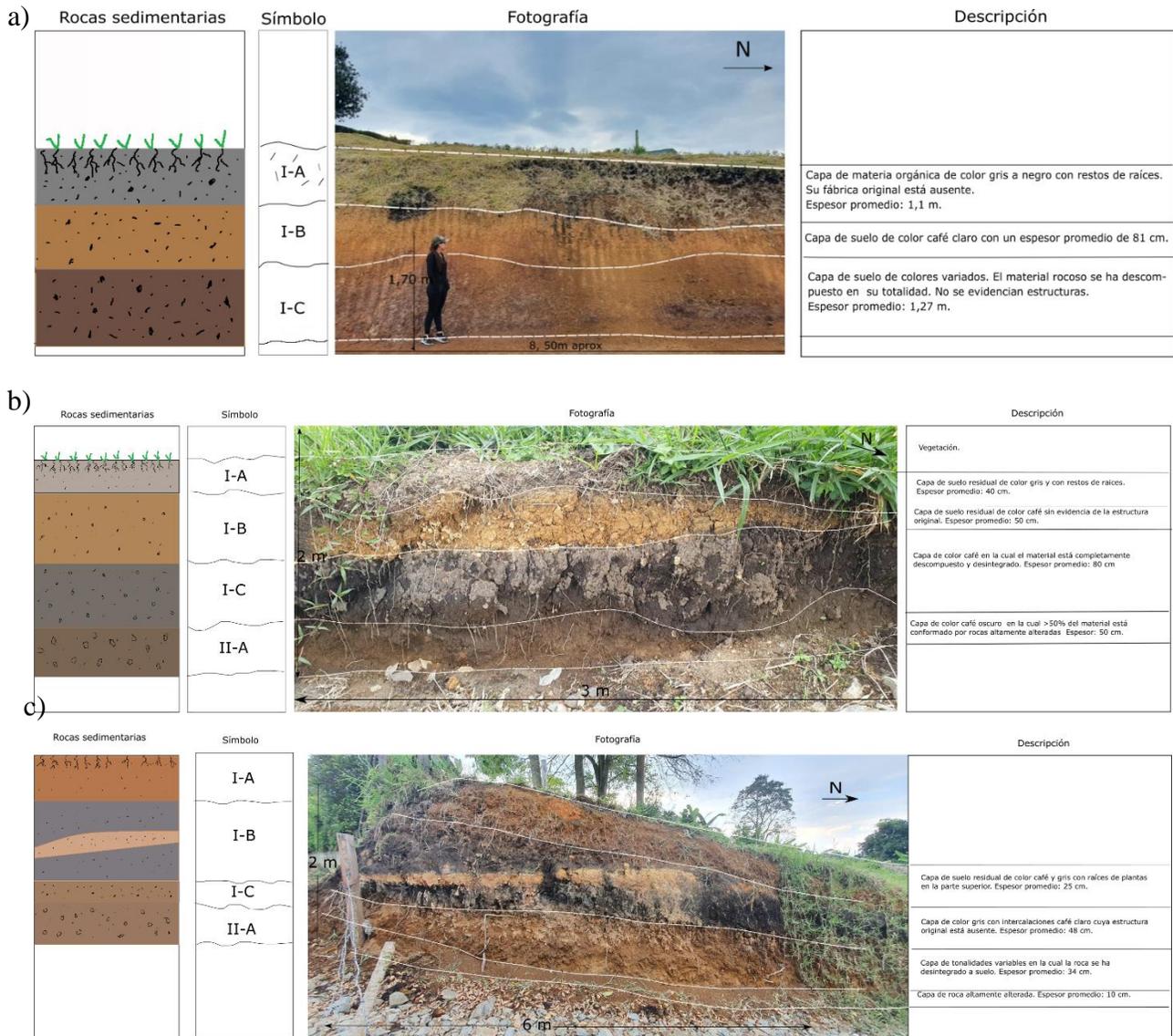


Figura 8 a, b y c. Perfiles de meteorización de la zona de estudio.

## 7. Discusión

### 7.1 Caracterización cualitativa y semi cuantitativa del potencial de generación de acidez (PGA)

Los análisis mineralógicos muestran que en algunas zonas de Titiribí se encuentran rocas con potencial de generación de acidez (PGA) debido a que cuentan con concentraciones importantes de minerales como pirita, jarosita, pirolusita, goethita y hematita que, como consecuencia de su exposición a la intemperie, se oxidan y producen acidez que eventualmente puede llegar a ser nocivo para la flora, fauna y habitantes de la región.

El potencial de generación de acidez (PGA) (Tabla 1) de las rocas estudiadas, se determinó con base en la mineralogía previamente analizada para obtener una aproximación cualitativa y semi cuantitativa. Así, se asignaron las categorías improbable, posible e incierto según el porcentaje de minerales tanto con potencial de generación de acidez como de alcalinidad de cada grupo de muestras y los rangos nulo, medio, bajo y alto según su PGA.

A modo general, las rocas con potencial improbable cuentan con un porcentaje superior de carbonatos respecto a los sulfuros, lo cual genera alcalinidad y neutralización de la acidez. Las inciertas contienen porcentajes similares tanto de carbonatos como de sulfuros, por lo cual requieren análisis más detallados para determinar si tienen o no potencial y, por último, las posibles cuentan con un porcentaje de sulfuros mayor que los carbonatos o no presentan carbonatos. En cuanto a los rangos se tiene nulo para categorías improbables, bajo y medio para las inciertas y medio y/o alto para rocas con categoría posible.

Posteriormente, se realizó un promedio de las muestras de cada litología con el fin de hacer una síntesis general al momento de categorizarlas. De esta manera se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Improbables:** la única roca catalogada con categoría improbable es la lodolita abigarrada debido a la presencia de carbonatos, sin evidencia de sulfuros, como se evidencia en la Tabla S3.
- **Inciertas:** las rocas en la categoría de incierto son las sublitoarenitas debido a que cuentan con carbonatos y sulfuros en proporciones similares, como se muestra en la Tabla S3.
- **Posibles:** en esta categoría se encuentran la lodolita carbonosa, litoarenitas, litoarenitas feldespáticas, granodioritas, pórfido andesítico, esquistos moscovíticos y verdes porque tienen mayor porcentaje de sulfuros que de carbonatos o incluso, en algunas muestras estos últimos están ausentes. La mineralogía se puede observar de forma más detallada en las Tablas S3, S4 y S5.

La Figura S10 resume de forma gráfica los resultados obtenidos para las categorías y rangos PGA de cada grupo de muestras analizadas.

Tabla 1. Potencial de generación de acidez para las diferentes litologías.

ROCAS SEDIMENTARIAS			
UNIDAD	LITOLOGÍA	CATEGORÍA PGA	RANGO PGA
Formación Amagá	Lodolita abigarrada	Improbable	Nulo
Formación Amagá	Lodolita carbonosa	posible	Medio
Formación Amagá	Sublitoarenita	Incierto	Bajo-medio
Formación Amagá	Litoarenita	Posible	Medio
Formación Amagá	Litoarenita feldespática	Incierto	Bajo
ROCAS ÍGNEAS			
UNIDAD	LITOLOGÍA	CATEGORÍA PGA	RANGO PGA
Diorita de Pueblito	Granodiorita	Posible	Medio
Rocas hipoabisales porfiríticas	Pórfido andesítico	Posible	Medio-alto
ROCAS METAMÓRFICAS			
UNIDAD	LITOLOGÍA	CATEGORÍA PGA	RANGO PGA
Grupo Ayurá-Montebello	Esquisto moscovítico	Posible	Medio-alto
Grupo Ayurá-Montebello	Esquisto verde	Posible	Alto

## 7.2 Factores que controlan la generación de DAR

El desarrollo del DAR es un proceso dependiente del tiempo que involucra procesos de oxidación tanto química como biológica y fenómenos fisicoquímicos asociados, incluyendo la precipitación y el encapsulamiento (Guevara, 2015). Pese a que este es un proceso que ocurre de forma natural, la acción de actividades antrópicas como minería y construcciones pueden acelerar la ocurrencia de este fenómeno. Además, la actividad bacteriana también influye al actuar como catalizadora en la reacción que conduce a la generación de DAR.

En la zona de estudio, el proceso de generación de DAR se ve influenciado por múltiples variables como:

- **Temperatura:**

Como se observa en la Figura S11, la temperatura promedio de Titiribí es de 26°C. Se sabe que, a mayor temperatura, el proceso de oxidación se acelera y que, en el caso de la pirita, esta se produce a 25-30°C (Lazo, 2020). Esto se logra evidenciar en las muestras analizadas, pues han desarrollado un proceso de oxidación que va desde tonos amarillo pardo hasta muy rojizos.

- **Mineralogía:** la zona de Titiribí cuenta con una mineralogía muy variada, lo cual se evidencia en la presencia de diferentes tipos de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas (Figuras S2-S9). Se destaca la presencia de óxidos como jarosita, pirolusita, goethita y hematita, que pueden generar acidez, así como carbonatos y feldespatos en algunos puntos que pueden neutralizarla.

- **Área superficial expuesta:** en las zonas aledañas a Titiribí fue posible evidenciar diferentes actividades antrópicas como minería y construcciones (Figura S12). Las obras y explanaciones que se requieren para ejecutar estas actividades hacen que gran cantidad de material quede expuesto a la intemperie, acelerando la oxidación de minerales.
- **Presencia de agua:** las áreas más húmedas produjeron tasas más altas que aquellas áreas donde no había agua disponible, esto se puede evidenciar principalmente por el estado de meteorización de algunas muestras recolectas. Así, la superficie mineral fresca produce más oxidación debido a los ciclos de humectación y secado.
- **Bacterias catalizadoras:** la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* actúa como catalizadora en el proceso de generación del DAR a  $\text{pH} < 4,5$ , pues oxida el ion ferroso a férrico y la pirita, produciendo más ácido. Sin embargo, esto no es algo que se evidencie a simple vista, pero teóricamente el ambiente es óptimo para que ésta se encuentre en la zona.

### 7.3 Impacto en los cuerpos de agua

Según la Figura 6, se evidencia que la mayoría de las muestras analizadas están ubicadas cerca de cuerpos de agua (ríos y quebradas). Si además se analiza la pendiente, es posible identificar ciertos puntos críticos para la generación de acidez, debido a que un punto ubicado en una zona de pendientes altas puede facilitar el transporte del drenaje ácido hasta los cuerpos de agua a velocidades mayores que en pendientes moderadas o bajas. Este es el caso de estaciones como AJ15 y AJ16 en la zona oriental, ubicados en pendientes entre  $40^\circ$  y  $50^\circ$  y AJ13 y AJ18 en zonas de pendientes moderadas ( $30-40^\circ$ ) ubicadas en la parte central y suroeste de la zona de estudio, respectivamente. Sin embargo, puntos ubicados en pendientes bajas a moderadas también pueden suponer ciertos inconvenientes debido a que el drenaje ácido puede concentrarse en los cuerpos superficiales.

### 7.4 Medidas de control y mitigación de impactos

Debido a que las actividades de minería, construcciones, entre otras ya se desarrollan en la zona, y, además, hay zonas expuestas oxidadas, se deben implementar medidas correctivas que permitan minimizar el posible impacto en los ecosistemas para limitar la generación de DAR. Entre estas acciones se puede hacer uso de la neutralización con cal sobre las zonas

afectadas y de bactericidas (Osvaldo Aduvire, 2006), y la revegetación de los terrenos, pues debido a que el estudio se desarrolló sobre carreteras y zonas aledañas, se requieren medidas de mitigación localizadas y de costos moderados. Asimismo, evitar la exposición de rocas en zonas con potencial de PGA podría ser un buen método de control y prevención a mediano-largo plazo.

## **8. Conclusiones**

1. La litología es un factor importante en la generación de drenaje ácido. En el análisis realizado, las rocas sedimentarias (areniscas) son la litología dominante. Estas presentan la mayor cantidad de óxidos de Fe y Mn, y esto ocurre porque la disolución de sulfuros tiende a ser más rápida en rocas sedimentarias como areniscas que en otras litologías por factores como compactación y porosidad.
2. La variedad de formaciones que componen esta zona hace que se presente una amplia diversidad litológica. Como consecuencia, se tienen no sólo minerales generadores de acidez, sino también minerales generadores de basicidad como los carbonatos, que son capaces de neutralizarla.
3. Las condiciones climáticas del municipio de Titiribí son óptimas para la oxidación y posterior generación de drenaje ácido debido a su temperatura promedio de 26°C y a que es una zona húmeda que se ve afectada en la temporada de lluvias, que ayudan a la infiltración de los ácidos en los suelos.
4. De todas las muestras analizadas, los puntos AJ15 y AJ16 son los más vulnerables a la generación de drenajes ácidos, debido a la pendiente de la zona y a que cuentan con presencia de sulfuros y óxidos.
5. Los esquemas de perfiles de meteorización de Deere & Patton y la columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio permitieron evidenciar la fuerte meteorización fisicoquímica de la zona producto de los factores mencionadas anteriormente que influyen en la generación del DAR. Esto hace posible corroborar la oxidación de minerales de sulfuro debido a su exposición a la intemperie.
6. Con base en la categorización macroscópica y su análisis de PGA, es posible identificar que el 90% de las muestras analizadas se clasifican dentro del rango de PGA como inciertas o posibles, lo que permite entender que la generación de acidez es muy probable en la zona

de estudio. Cabe resaltar que esta es una aproximación preliminar y teórica, pero que sirve de indicador en áreas que pueden empezar a presentar problemas de acidificación y lixiviación de metales a mediano-largo plazo.

## **9. Recomendaciones**

1. Realizar este tipo de estudios preliminares antes de llevar a cabo análisis cuantitativos como los cinéticos y estáticos para optimizar tiempos, minimizar costos y poder caracterizar zonas que no cuenten con el capital para llevarlos a cabo.
2. Realizar análisis cinéticos (celdas húmedas) que, al recrear el escenario natural de oxidación en un laboratorio, permiten hacer estimaciones más asertivas sobre cuánto y cuándo se dará la generación ácida en la zona de estudio.
3. Ejecutar análisis estáticos (ABA), un test geoquímico de balance ácido-base que permite predecir el potencial de generación de DAR, por medio de la evaluación del comportamiento geoquímico de los materiales al ser sujetos a la meteorización.
4. Teniendo en cuenta que Titiribí es una zona potencialmente carbonífera, se recomienda hacer análisis de caracterización de carbones que permitan determinar el porcentaje de azufre y sulfuros contenidos y asociados para evaluar su potencial de generación de acidez.
5. Implementar medidas de prevención, mitigación y control de zonas con PGA, no solo en áreas mineras, sino también en aquellas que bien sea por actividad natural o antrópica se encuentran expuestas a la intemperie.
6. Llevar a cabo medidas preventivas en zonas que serán destinadas a construcciones (vías, explanaciones, entre otras), para evitar un impacto ambiental difícil de controlar. Esto incluye revegetación de los terrenos y reforestación para aislar el material geológico de la intemperie, recubrimiento de zonas expuestas, control de pH, entre otras.
7. Implementar una buena planeación de la zona partiendo de un enfoque ambiental, debido a que el aprovechamiento del recurso hídrico puede verse considerablemente afectado ante la eventual generación de DAR como resultado de las trazas de metales pesados, que contribuyen con la disminución de la calidad del agua.

8. Realizar modelos geoambientales con el fin de proporcionar una base para comprender e interpretar los procesos ambientales relacionados con los depósitos minerales. Esto con el fin de evaluar los posibles efectos y establecer medidas de prevención y mitigación ambiental.

## 10. Referencias

- AAS SA., 2008. Plan de Saneamiento y manejo de Vertimientos (PSMV). Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A. g. Municipio de Titiribí.
- ADUVIRE, E. O.(2006). Drenaje ácido de mina: Generación y Tratamiento. MADRID. IGME.
- Akcil, A., & Koldas, S., 2006. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12–13), 1139–1145.
- Álvarez, E. & González, H., 1978. Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7 (Urrao). INGEOMINAS. Informe 1761. Medellín. 347P.
- Arismendy, S., 2020. Problemática ambiental generada por el drenaje ácido de mina en la explotación de yacimientos mineros en Colombia. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. 1-118.
- Barón, A., 2013. Caracterización del drenaje ácido generado en una mina de oro y propuesta técnica de remediación (tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Bigham, J.M. & Nordstrom, D.K., 2000. Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters. *Rev. Mineral. Geochem.* 40, 351–403.
- Bogado, G. O., & Francisca, F. M. 2017. Caracterización geo-mecánica de un perfil de meteorización residual. *Revista FCEFYN*, 4,1, 1-9.
- Cediel, F., Shaw, R., Cáceres, C., 2003. Tectonic assembly of the Northern Andean block. In: Bartolini, C., Buffler, R., Blickwede, J. (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics*, 79. American Association of Petroleum Geologists Memoir, pp. 815–848.

- CORANTIOQUIA, 2007. Plan de ordenación y manejo Cuenca de la Quebrada Sinifaná municipios de Caldas, Amagá, Fredonia, Venecia y Titiribí. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia -CORANTIOQUIA-. Medellín.
- CORANTIOQUIA. 2000. Los organales como sitios de actividad humana antigua en Antioquia: municipio de Titiribí. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia -CORANTIOQUIA-. Medellín.
- CORANTIOQUIA. 2005. Plan de ordenamiento y manejo del área de reserva “la candela, la maría y corcovado” municipio de Titiribí, Antioquia. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia -CORANTIOQUIA-. Medellín.
- Díaz, J., 2013. Tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido, generado por la actividad minera en el municipio de Marmato-Caldas. Universidad de Manizales, 1-95.
- Dutta, M., Saikia, J., Taffarel, S., Waanders, F., Medeiros, D., Cutruneo, C., Silva, L., & Saikia, B., 2017. Environmental assessment and nano-mineralogical 118 characterization of coal, overburden and sediment from Indian coal mining acid drainage. *Geoscience Frontiers*, (8), 1285- 1297.
- Furniss, G., Hinman, N.W., Doyle, G.A., Runnells, D.D., 1999. Radiocarbon-dated ferricrete provides a record of natural acid rock drainage and paleoclimatic changes. *Environ. Geol.* 37, 102–106.
- Gault, K.B.F., Gammon, P., Fortin, D., 2015. A geochemical characterization of cold-water natural acid rock drainage at the Zn–Pb XY deposit, Yukon, Canada. *Appl. Geochem.* 62, 35–47.
- Gómez, A., Moreno, M., Pardo, A., 1995. Edad y origen del “Complejo metasedimentario de Aranzazu-Manizales” en los alrededores de Manizales, Departamento de Caldas, Colombia. *Geología Colombiana*, 19, p. 83-93. Bogotá.
- González, H., 1976. Geología del Cuadrángulo J-8 Sonsón. INGEOMINAS. Informe 1704, 421 p. Medellín.
- González, H., 1980. Geología de las Planchas 167 Sonsón y 187 Salamina. *Boletín Geológico. INGEOMINAS*. Vol. 23(1). 174 p. Bogotá.

- González, H., 2001. Memoria explicativa del mapa geológico del departamento de Antioquia. Igeominas. Bogotá. 256p.
- Grosse, E., 1926. Estudio Geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia: Berlín, Verlag Von Dietrich Reimer (Ernst Vohsen), 361 pp.
- Guevara, J. (2015). Generación de acidez por la presencia de sulfuros en el futuro tajo del proyecto minero “El Galeno” (Tesis de Maestría en Gestión y Auditorías Ambientales). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.
- Guzmán, C.A., 2007. Estudio diagenético preliminar de la Formación Amagá. Boletín de Geología, vol 29, 1, p. 1-8.
- Henao, J.E., 2012. Estratigrafía y petrografía de las areniscas de la secuencia quebrada La Naranjala, municipio de Fredonia, Miembro Inferior de la Formación Amagá. Bachelor thesis, Universidad EAFIT, 53 p. Medellín.
- Hurlbut, C. S., Klein, C., & Dana, J. D. (1981). Manual de mineralogía de Dana. Editorial Reverté.
- Ilyashuk, B.P., Ilyashuk, E.A., Psenner, R., Tessadri, R., Koinig, K.A., 2014. Rock glaciers outflows may adversely affect lakes: lessons from the past and present of two neighboring water bodies in a crystalline rock watershed. Environ. Sci. Technol. 48, 6192–6200.
- INAP, International Network for Acid Prevention. Global Acid Rock Drainage Guide., 2014, 473p. [En línea]. Disponible en: [http://www.gardguide.com/index.php?title=Main\\_Page](http://www.gardguide.com/index.php?title=Main_Page)
- INGEOMINAS., 1993. Fallas Activas en Colombia. Ministerio de Minas y Energía.
- Kwong, Y.T.J., Whitley, G., Roach, P., 2009. Natural acid rock drainage associated with black shale in the Yukon territory. Canada. Appl. Geochem. 24, 221–231.
- Lazo, D. (2020). Acid mine drainage mitigation: A review. Ingeniería Industrial, 039, 97–118.

- Manning, A.H., Verplanck, P.L., Caine, J.S., Todd, A.S., 2013. Links between climate change, water-table depth, and water chemistry in a mineralized mountain watershed. *Appl. Geochem.* 37, 64–78.
- Mejía, Mario., 1984. Geoquímica de la plancha 130 “Santa Fe de Antioquia” y 146 “Medellín Occidental”. Informe INGEOMINAS, Medellín, 376pp.
- Montes, N.E; Sandoval, A; Vergara, H., 1999. Mapa de fallas activas de Colombia. Escala 1: 1. 500. 000. INGEOMINAS.
- Moreno, T., 2014. Enriquecimiento de comunidades sulfato reductoras degradadoras de acetato en condiciones ácidas (tesis de maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y tecnológica, A, C, San Luis Potosí.
- Nieves, N & Solano, A., 2017. Characterization of acid drainage in the minerals of esmeralda Quípama-Boyacá. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas.* 11, 2, 318-325.
- Nordstrom, D. K., 2011a. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters. *Applied Geochemistry*, 26(11), 1777–1791.
- Nordstrom, D.K., & Alpers, C.N., 1999. Geochemistry of Acid Mine Waters. In: *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques and Health Issues* (Eds.: Plumlee, G.S., and M.J. Logsdon). *Reviews in Economic Geology Vol 6A.* Society of Economic Geologists, Inc.
- Nordstrom, D.K., 2003. Effects of Microbiological and Geochemical Interactions in Mine Drainage. In: *Environmental Aspects of Mine Wastes* (Eds. Jambor, J.L., D.W. Blowes, and A.I.M. Ritchie). *Short Course Series Volume 31.* Mineralogical Association of Canada.
- Nordstrom, D.K., 2009. Acid rock drainage and climate change. *J. Geochem. Explor.* 100, 97–104.
- Nordstrom, D.K., 2011b. Mine waters: acidic to Circumneutral. *Elements* 7, 393–398.
- Paris, G., Machette, M., Dart, R. y Haller, K., 2000. Map and database of Quaternary faults and folds in Colombia its offshore regions. USGS open-file report 00-0284. Map at 2,500,000 scale and report, 66 pp. USGS.

- Peláez, E., 2016. Obtención de paleoesfuerzos del sistema de fallas Cauca-Romeral en el sector norte de la Cuenca Amagá, entre las localidades de Titiribí y Quebrada Sinifaná. Bachelor Thesis, Universidad EAFIT, Medellín.
- Peña, J. & Pérez, W., 2009. Manejo de drenajes ácidos de mina DAM. Universidad industrial de Santander.
- Peppas, A., Komnitsas, K., & Halikia, I., 2000. Use of organic covers for acid mine drainage control. *Minerals Engineering*, 13(5), 563–574.
- Plaza, F., Wen, Y., Perone, H., Xu, Y., Liang, X., 2017. Acid rock drainage passive remediation: potential use of alkaline clay, optimal mixing ratio and long-term impacts. *Sci. Total Environ.* 15, 572–585.
- Qian, Gujie & Li, Yubiao., 2019. Acid and Metalliferous Drainage—A Global Environmental Issue. 1. 1-4.
- Regmi, N. R., Giardino, J. R., & Vitek, J. D. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1–2), 172–187.
- Restrepo, J. & Toussaint, J. F., 1987. ¿El grupo Ayurá- Montebello tiene todavía validez estratigráfica?. *Memorias Seminario Gerardo Botero Arango*, Medellín, 167-173p.
- Rezaie, B. & Anderson, A., 2020. Sustainable resolutions for environmental threat of the acid mine drainage. *Sci. Total Environ.* 717, 137211.
- Salerno, F., Rogora, M., Balestrini, R., Lami, A., Tartari, G.A., Thakuri, S., Tartari, G., 2016. Glacier melting increases the solute concentrations of Hilalayan glacial lakes. *Environ. Sci. Technol.* 50, 9150–9160.
- Sierra L., G. M., Silva T., J. C., Correa O., L. G., 2003. Estratigrafía secuencial de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (15), 9–22.
- Sierra, G., Silva, J. C. y Correa, L. G., 2001. Estratigrafía Secuencial de la Formación Amagá. *Boletín Ciencias de la Tierra*.15, 9-22p. Medellín.
- Skousen, J. G., Johnson, C. D., & Garbutt, K., 1994. Natural Revegetation of 15 Abandoned Mine Land Sites in West Virginia. *Journal of Environmental Quality*, 23(6), 1224–1230.

- Skousen, J., Sencindiver, J., Owens, K., & Hoover, S., 1998. Physical Properties of Minesoils in West Virginia and Their Influence on Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Quality*, 27(3), 633–639.
- Skousen, J., Ziemkiewicz, P., 1996. “Overview of Acid Mine Drainage at Source: Control Strategies.” *Acid Mine Drainage: Control and Treatment*, Morgantown, WV, University and the National Mine Land Reclamation Center, pp. 69-78
- Stumm, W., & Morgan, J.J., 1981. *Aquatic Chemistry*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons.
- Talukdar, B., Kalita, H.K., Baishya, R.A., Basumatary, S., Sarma, D., 2016. Evaluation of genetic toxicity caused by acid mine drainage of coal mines on fish fauna of Simsang River, Garohills, Meghalaya, India. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 131, 65–71.
- Todd, A.S., Manning, A.H., Verplanck, P.L., Crouch, C., McKnight, D.M., Dunham, R., 2012. Climate-change-driven deterioration of water quality in a mineralized watershed. *Environ. Sci. Technol.* 46, 9324–9332.
- Toussaint, J.F., y Restrepo, J.J., 1984. Falllamientos superpuestos del Sistema de Cauca – Romeral (S.L.) en los alrededores de Medellín (Flanco Noroccidental de la Cordillera Central de Colombia). *Memorias I conferencia de riesgos geológicos en el Valle de Aburrá, Medellín*. Diciembre 3 al 6.
- Van Der Hammen, T., 1958. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano y Tectogénesis de los Andes Colombianos. *Bol. Geol. Bogotá*. 1-15p.
- Vinasco, C.J., Cordani, U.G., González, H., Weber, M., Peláez, C., 2006. Geochronological, isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes: *Journal of South American Earth Sciences*, 21, 355-371p.
- Ziemkiewicz, P.F., Skousen, J.G., Brant, D.L., Sterner, P.L., Lovett, R.J., 1997. Acid mine drainage treatment with armored limestone in open limestone channels. *J. Environ. Qual.* 26, 1017–1024.

## 11. Anexos



Figura S 1. Herramientas y técnicas utilizadas

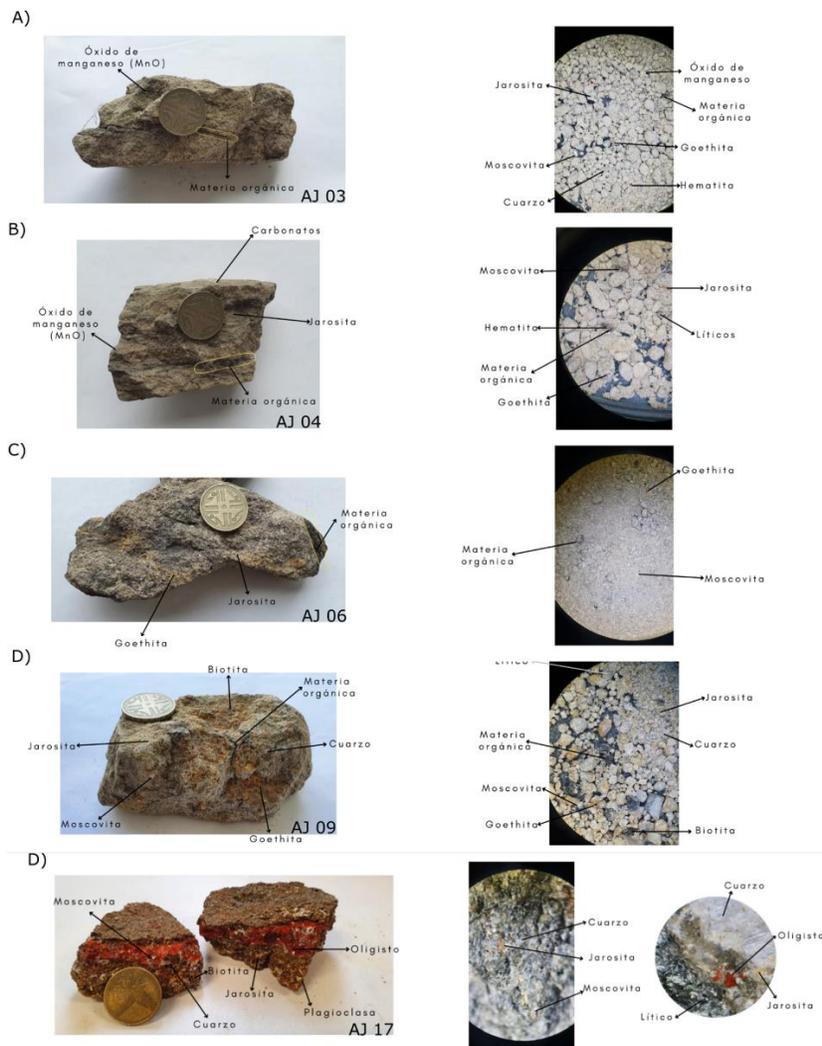
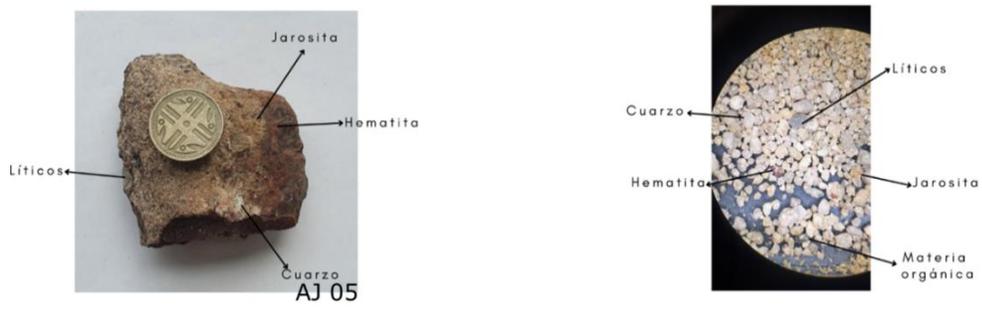


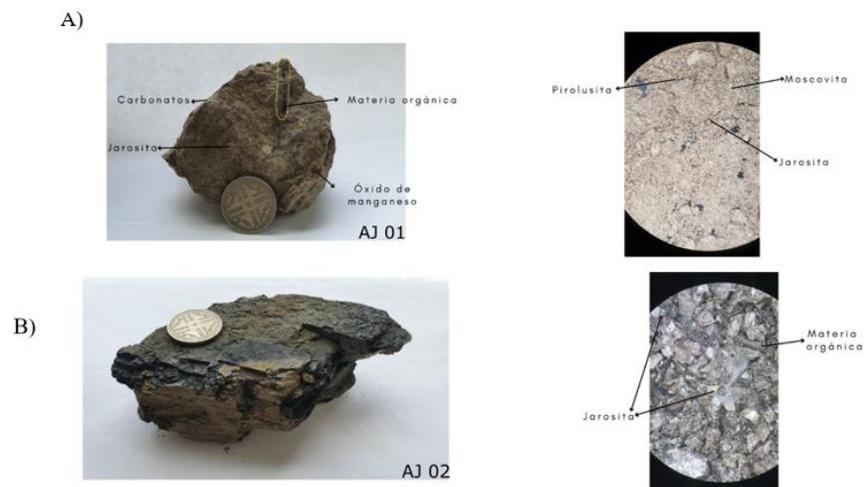
Figura S 22. Litoarenitas.



*Figura S 3. Litoarenitas feldespáticas.*



*Figura S 4. Cuarzoarenitas.*



*Figura S 5. Lodolitas.*

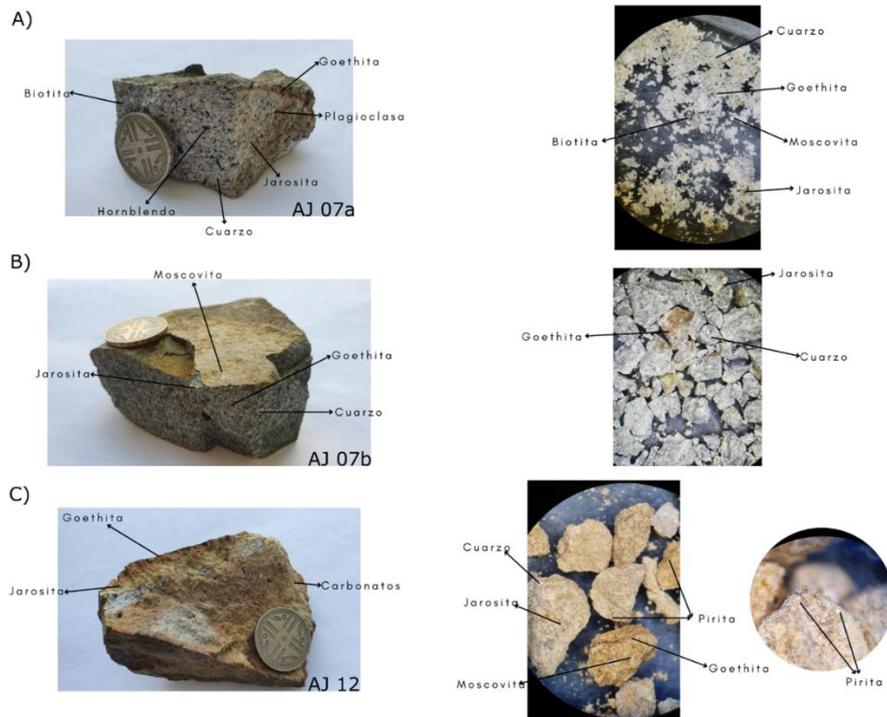


Figura S 6. Granodioritas.

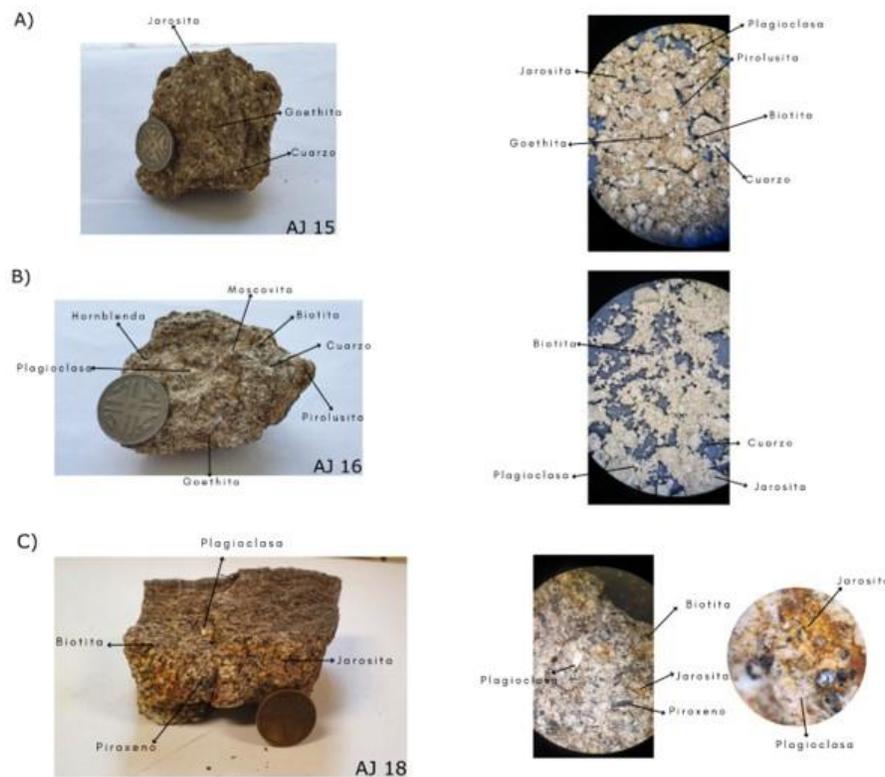
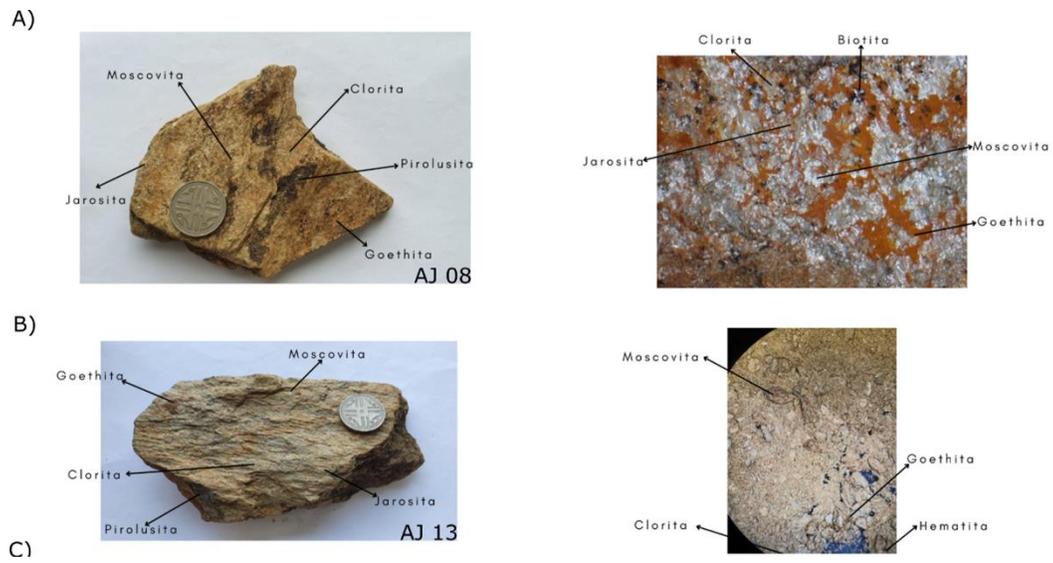
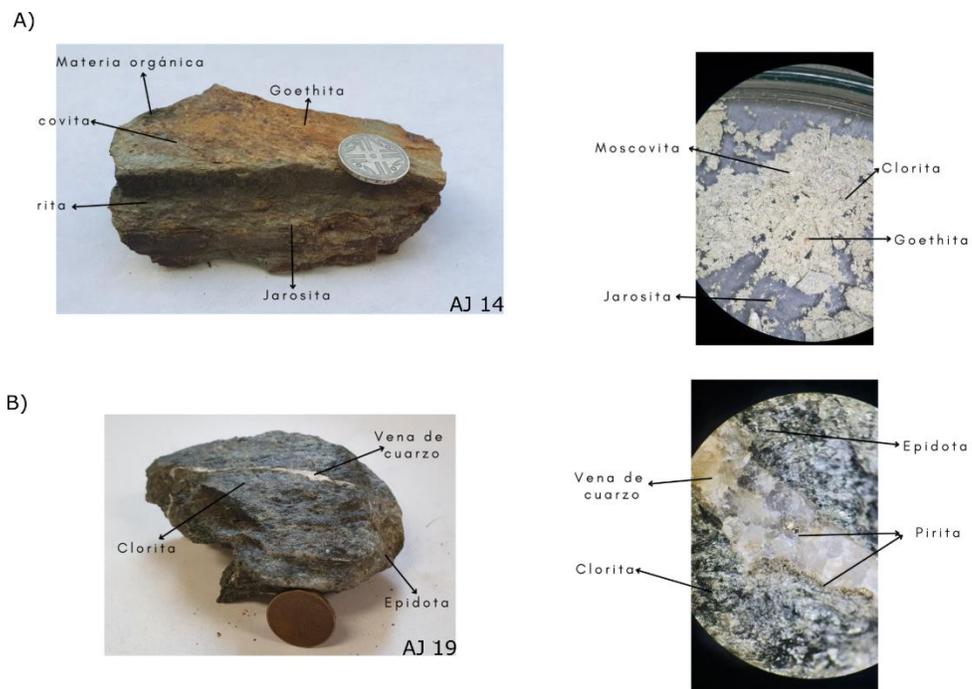


Figura S 7. Andesitas porfídicas.



*Figura S 8. Esquistos moscovíticos.*



*Figura S 9. Esquistos verdes.*

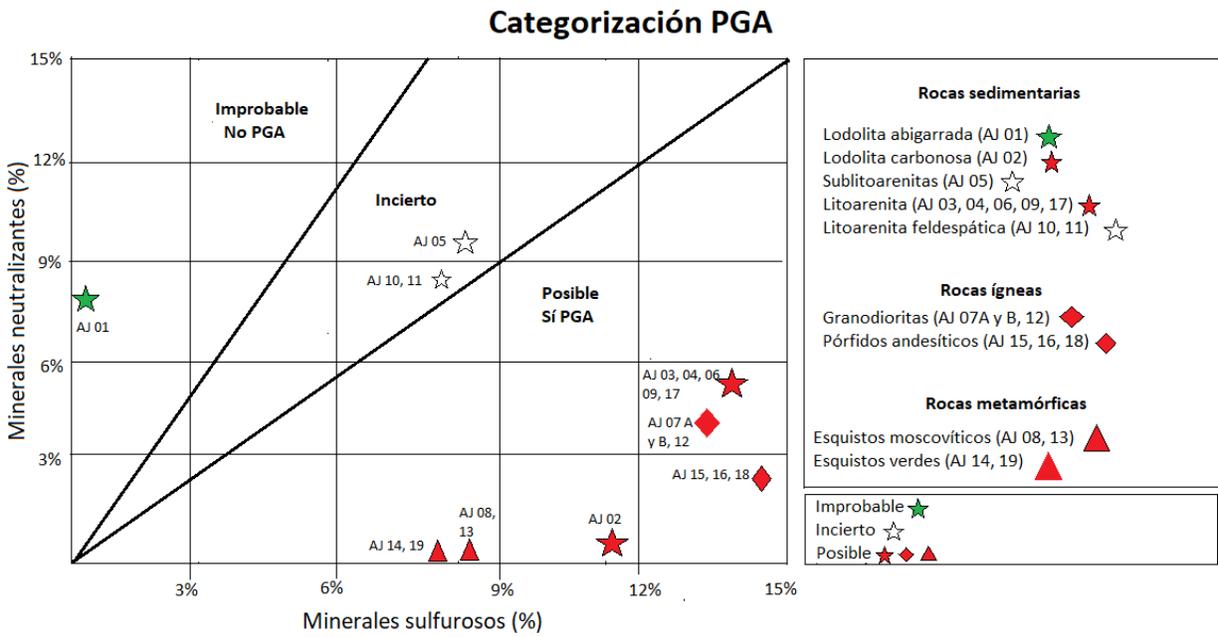


Figura S 10. Categorización PGA.

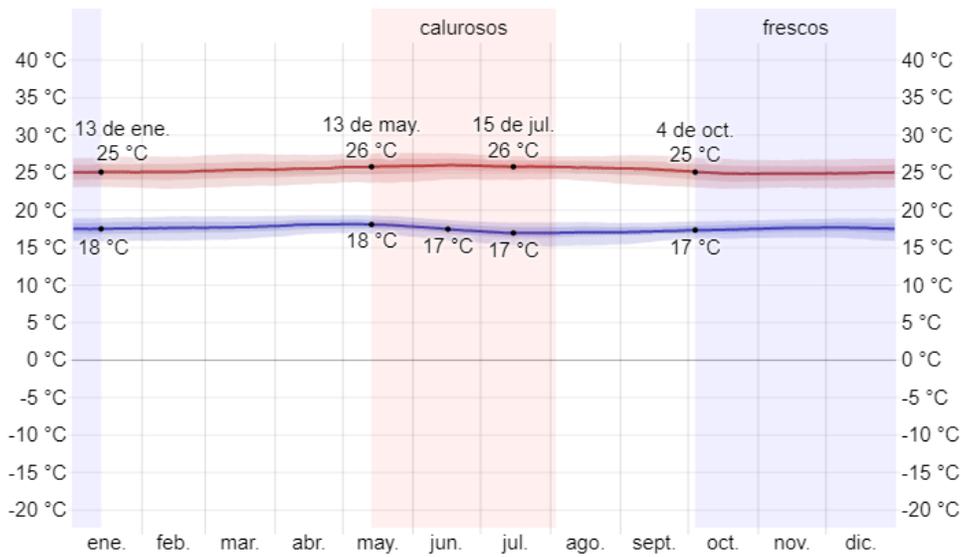


Figura S 11. Temperatura máxima, mínima y promedio de Titiribí. Tomado de: [www.weatherspark.com](http://www.weatherspark.com).



Figura S 12. Área de explanación para construcciones en la zona.

Tabla S 1. Tipos de drenaje ácido (Skousen & Ziemkiewics, 1996).

TIPO	pH	DESCRIPCIÓN
I	< 4,5	Alta concentración de Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, y otros metales. Alto contenido de oxígeno. Muy ácido (llamado Drenaje Ácido de Mina)
II	< 6,0	Alta cantidad de sólidos disueltos. Alta concentración de ión ferroso ( $Fe^{2+}$ ) y Mn. Bajo contenido de oxígeno. Por oxidación, el pH del agua baja drásticamente hasta convertirse en Tipo I.
III	> 6,0	Moderada a alta cantidad de sólidos disueltos. Bajo a moderado contenido de ion ferroso ( $Fe^{2+}$ ) y Mn. Bajo contenido de oxígeno. Alta alcalinidad (llamado Drenaje Alcalino de Mina). Por oxidación de metales la acidez generada es neutralizada por la alcalinidad presente en el agua.
IV	> 6,0	Alta cantidad de partículas disueltas. Drenaje neutralizado, pero todavía no se han fijado los hidróxidos en el agua. A mayor tiempo de residencia en las balsas mayor fijación de partículas y el agua puede llegar a ser similar al de Tipo V.
V	> 6,0	Agua del drenaje es neutralizado. Alta cantidad de sólidos disueltos. Gran cantidad de hidróxidos precipitados y fijados en las balsas. Cationes restantes son disueltos por Ca y Mn. Oxi-aniones solubles como bicarbonato y sulfato quedan en la solución.

Tabla S 2. Esquema de meteorización según Deere & Patton, (1971).

DEERE Y PATTON (1971) (Todas las rocas)		DEARMANN (1974)* (Todas las rocas)	CARACTERÍSTICAS DE CAMPO
I SUELO RESIDUAL	HORIZONTE A IA	VI SUELO RESIDUAL	- Generalmente de color oscuro. - Las capas superiores contienen humus y restos de raíces de plantas. - Todo el material rocoso es convertido a suelo - La macrofábrica y la estructura original es destruida.
	HORIZONTE B IB	V ROCA COMPLETAMENTE METEORIZADA	- Roca decolorada pasando generalmente a colores variados - Material rocoso completamente descompuesto y desintegrado a suelo, pero aún conservando algo de la macrofábrica original. - Las estructuras heredadas (diaclasas, planos de estratificación y fallas) se conservan.
	HORIZONTE C (SAPROLITO) IC		
II ROCA METEORIZADA	IIA TRANSICIÓN DESDE SAPROLITO HASTA ROCA METEORIZADA	IV ROCA ALTAMENTE METEORIZADA	- Roca decolorada y altamente alterada, con el cual mas del 50% del material rocoso es desintegrado a suelo. - Las estructuras heredadas de la roca original (planos de estratificación, diaclasas y fallas) se mantienen.
	IIB ROCA PARCIALMENTE METEORIZADA	III ROCA MODERADAMENTE METEORIZADA	- Roca con notable meteorización y considerablemente alterada, en la cual menos del 50% del material rocoso es desintegrado a suelo. - Las discontinuidades pueden estar oxidadas y abiertas.
III ROCA NO METEORIZADA		II ROCA LIGERAMENTE METEORIZADA	- La roca puede estar débilmente decolorada en las superficies de las discontinuidades, las cuales pueden estar abiertas y oxidadas.
		I ROCA FRESCA	- Rocas sin signos de desintegración. La superficie de las discontinuidades con ligera decoloración.

Tabla S 3. Mineralogía y clasificación de las rocas sedimentarias.

ROCAS SEDIMENTARIAS				
MUESTRA	COORDENADAS	FORMACIÓN	ROCA	MINERALOGÍA
AJ 01	6° 01' 26" N - 75° 45' 53" W	Formación Amagá	Lodolita abigarrada	Cuazo, moscovista, materia orgánica, óxidos, biotita, pirolusita
AJ 02	6° 01' 26" N - 75° 45' 54" W	Formación Amagá	Lodolita carbonosa	Materia orgánica
AJ 03	6° 01' 27" N - 75° 45' 56" W	Formación Amagá	Litoarenita	Cuarzo, micas (moscovitas), carbón, óxidos (hematita, goethita y jarosita)
AJ 04	6° 01' 27" N - 75° 45' 46" W	Formación Amagá	Litoarenita	Cuarzo, moscovita, biotita, jarosita, líticos, goethita, hematita
AJ 05	6° 01' 27" N - 75° 45' 57" W	Formación Amagá	Sublitoarenita	Cuarzo, biotita, hematita, moscovita, materia orgánica, jarosita, líticos
AJ 06	6° 01' 28" N - 75° 45' 58" W	Formación Amagá	Litoarenita	Cuarzo, plagioclasa, micas (moscovita, biotita), materia orgánica, jarosita, goethita
AJ 09	6° 03' 36" N - 75° 47' 01" W	Formación Amagá	Litoarenita	Cuarzo, biotita, materia orgánica, moscovita, plagioclasa, líticos, goethita, jarosita
AJ 10	6° 03' 40" N - 75° 47' 03" W	Formación Amagá	Litoarenita feldespática	Cuarzo, moscovita, pirolusita, biotita, jarosita
AJ 11	6° 03' 54" N - 75° 47' 46" W	Formación Amagá	Litoarenita feldespática	Materia orgánica, moscovita, cuarzo, plagioclasa, goethita, jarosita, pirolusita, hematita
AJ 17	6° 01' 28" N - 75° 45' 57" W	Formación Amagá	Litoarenita	Cuarzo, plagioclasa, moscovita, oligisto, jarosita, fragmentos líticos (gneos (?), pirolusita, biotita)

Tabla S 4. Mineralogía y clasificación de las rocas ígneas.

ROCAS ÍGNEAS				
MUESTRA	COORDENADAS	FORMACIÓN	ROCA	MINERALOGÍA
AJ 07 a	6° 01' 6" N - 75° 46' 02" W	Diorita de Pueblito	Granodiorita	Anfibol, plagioclasa, cuarzo, micas (moscovitas, biotitas)
AJ 07 b	6° 01' 6" N - 75° 46' 02" W	Diorita de Pueblito	Granodiorita	Cuarzo, micas (moscovita, biotita), cloritización, plagioclasa, óxidos, jarosita, goethita
AJ 12	6° 04' 11" N - 75° 47' 54" W	Diorita de Pueblito	Granodiorita	Cuarzo, moscovita, pirlita, jarosita, goethita, hematita (?), pirolusita
AJ 15	6° 03' 58" N - 75° 45' 28" W	Diorita de Pueblito	Pórfido andesítico	Biotita, plagioclasa, cuarzo, jarosita, goethita, pirolusita
AJ 16	6° 03' 49" N - 75° 45' 23" W	Rocas hipoabisales porfíricas	Pórfido andesítico	Cuarzo, plagioclasa, moscovita, biotita, piroxenos y anfíboles, goethita, jarosita, pirolusita
AJ 18	6° 01' 49" N - 75° 45' 46" W	Rocas hipoabisales porfíricas	Pórfido andesítico	Plagioclasa, biotita, piroxeno, jarosita, pirolusita

Tabla S 5. Mineralogía y clasificación de las rocas metamórficas.

ROCAS METAMÓRFICAS				
MUESTRA	COORDENADAS	FORMACIÓN	ROCA	MINERALOGÍA
AJ 08	6° 04' 12" N - 75° 46' 42" W	Grupo Ayurá-Montebello	Esquisto moscovítico	Micas (moscovita y biotita), cloritización, morado, pirolusita, goethita, jarosita
AJ 13	6° 03' 54" N - 75° 46' 50" W	Grupo Ayurá-Montebello	Esquisto moscovítico	Moscovita, clorita, biotita, óxidos, materia orgánica, pirolusita, goethita, jarosita
AJ 14	6° 04' 01" N - 75° 46' 49" W	Grupo Ayurá-Montebello	Esquisto verde	Clorita, biotita, materia orgánica, goethita, jarosita
AJ 19	6° 0' 15" N - 75° 46' 13" W	Grupo Ayurá-Montebello	Esquisto verde	Clorita, pirlita, cuarzo, epidota

*Tabla S 6. Clasificación de pendientes según Regmi et al. (2010).*

Slope (SL)	<10°	2,631,299	1868	32	4	-2.10	0.40	-2.50
	10-20°	2,778,671	12,566	34	26	-0.30	0.10	-0.40
	20-30°	1,532,209	17,400	19	36	0.70	-0.20	0.90
	30-40°	956,744	12,703	12	26	0.80	-0.20	1.00
	40-50°	216,809	3513	3	7	1.00	0.00	1.00
	50-60°	31,890	377	0	1	0.70	0.00	0.70
	>60°	7189	21	0	0	-0.70	0.00	-0.70