

**DEFINICIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES EN EL DEPÓSITO DE ARENAS  
SILÍCEAS EN EBÉJICO, ANTIOQUIA, COLOMBIA.**

Tulio Daniel Herazo Germán  
Alexandra Vanessa Lora Montiel

MEDELLÍN  
UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
GEOLOGÍA

2020

**DEFINICIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES EN EL DEPÓSITO DE ARENAS  
SILÍCEAS EN EBÉJICO, ANTIOQUIA, COLOMBIA.**

Tulio Daniel Herazo Germán  
Alexandra Vanessa Lora Montiel

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Geólogo

Asesores: Mario Maya Sánchez  
José Vicente Franco  
Dr. Alejandro Beltrán Triviño

MEDELLÍN  
UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
GEOLOGÍA

2020

Nota de aceptación

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

Medellín, Enero de 2020

## **Agradecimientos**

### **Tulio Herazo**

*Ante todo, primero darle gracias a Dios porque me ha brindado la oportunidad de sacar adelante este proyecto, a mi familia que son las personas que siempre me apoyan y se alegran con cada uno de los logros obtenidos.*

*A mis compañeros de toda la vida Nandito, Beja, Carly, Buelvas, Beltrán, Velásquez, bula, Juanmi, entre otros.*

*A mi compañera de alegrías y tristezas, a mis abuelitas y a todas aquellas personas que han sembrado una semilla para formarme como persona, muchas gracias.*

*A mi compañera de proyecto de grado por su valioso apoyo y comprensión en cada uno de los pasos dados en esta etapa.*

### **Alexandra Lora**

*A Dios, a mis padres, a mis hermanos (Checho, Meche y Jesu), a mi abuelito, a mis sobrinitos Rafa y Chechi, a Duglis y la mona por su apoyo, amor, por ser mi motor y estar siempre ahí para mí.*

*A Lau, Titi, Nelson, a Pellito, a nena, a mis tíos, tías, primos y toda mi familia por brindarme su apoyo y su cariño.*

*A Eliazith, Ernest, Caro, Meli, Cami, Majo, y Churul por su amistad, comprensión y momentos compartidos.*

*A tuli por su paciencia y dedicación.*

### **Tulio y Alexandra**

*Finalmente agradecemos a todos esos compañeros que han estado a lo largo de estos 5 años siendo estos: las Gallis, José, Hecti, Jorge, kami, Core, Contre, Eudis, Adri, Nati, Richi, Marce, María, Dana, Yeiner, Kilby, turco, Cesar, Emilio, Wilches, entre otros.*

*A Eli, Ema, Paqui (negro), Hans y Rossemberg por sus valiosos conocimientos y colaboración.*

*A Leidy, Will, y Ana por su acompañamiento, amabilidad y actitud de servicio  
A nuestros profesores José Duque, Andrés Cárdenas, Camilo, Marco, Marcela, entre otros que aportaron un granito en nuestro proceso de formación.*

*Al Geólogo Vicente franco y al Profesor Alejandro Beltrán por su disposición, acompañamiento, enseñanza, su valioso tiempo y por siempre estar prestos con la mejor actitud ante cualquier inconveniente o duda que se presentara a lo largo del desarrollo del proyecto.*

*Al Profesor Mario Maya el cual fue un papá en la geología para nosotros trasmitiéndonos día tras día sus valiosos conocimientos, por enseñarnos a ser personas integrales, por su paciencia, disposición y confianza en nuestras capacidades para sacar adelante este proyecto.*

## **TABLA DE CONTENIDO**

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
1. GENERALIDADES	4
1.1 Objetivo general	4
1.2 Objetivos específicos	4
1.3 Planteamiento del problema	4
1.4 Pregunta de investigación	5
1.5 Hipótesis	5
2. ZONA DE ESTUDIO	5
2.1 Localización del área de estudio	5
2.2 Vías de acceso	7
2.3 Población	8
2.4 Clima	8
2.5 Actividad económica	8
3. ANTECEDENTES	9
3.1 Estudios anteriores realizados en la Formación Amagá	9
4. METODOLOGÍA	14
4.1 Recopilación de la información secundaria	15
4.2 Preparación del trabajo de campo.	15
4.2.1 Reconocimiento del área:	16
4.2.2 Elaboración de mapas y toma de información:	16
4.2.3 Protocolo para la toma de muestras:	19
4.2.4 Planeación de recorridos:	19
4.2.5 Levantamiento de columnas estratigráficas:	19
4.2.6 Diseño de tomografías de resistividad	19
4.3 Trabajo de campo	21
4.3.1 Levantamiento de columnas estratigráficas y recolección de muestras	21
4.3.2 Adquisición de tomografías eléctricas de resistividad	23
4.4. Trabajo Post-campo.	24
4.4.1 Análisis petrográfico	24
4.4.2 Procesamiento e inversión de datos	24
4.4.3 Elaboración de columnas estratigráficas	25

4.4.4. Estimación de recursos	25
5. MARCO TEÓRICO	27
6. MARCO GEOLÓGICO	28
6.1 Geología Regional	28
6.2 Geología Estructural	34
6.3 Geología Local	35
7. MERCADO DE LAS ARENAS SILÍCEAS	38
7.1 Producción y consumo	38
7.1.2 Consumo a nivel global	41
7.1.3 Producción a nivel nacional	44
7.1.4 Consumo nacional	45
7.1.5 Mercado regional	46
7.2 Usos de las arenas silíceas	47
7.2.1 Arenas para vidrio	47
7.2.2 Arenas para fundentes	49
7.2.3 Arenas para pintura	50
7.2.4 Arenas para concreto	51
7.2.5 Arenas para fracturación hidráulica	52
7.2.6 Arenas para sand-blasting.	54
7.3 Mercado local	55
7.3.1 Empresas que consumen arenas silíceas en Antioquia.	55
7.3.2 Precios de las arenas silíceas en el mercado local y regional	55
8.RESULTADOS	56
8.1 Columnas estratigráficas	56
8.1.1 Sección estratigráfica Vía Horna	56
8.1.1.1 Nivel de lodolitas – mantos de carbón:	57
8.1.1.2 Nivel de areniscas:	58
8.1.2 Sección estratigráfica Quebrada Juan Baquero	62
8.1.2.1 Nivel de lodolitas:	64
8.1.2.2 Nivel de mantos de carbón	64
8.1.2.3 Nivel de areniscas	65
8.1.3 Sección estratigráfica Quebrada Aguazul	75
8.3.2.1 Nivel de lodolitas:	76
8.1.3.2 Nivel de mantos de carbón	77

8.1.3.3 Nivel de areniscas	78
8.2 Descripción petrográfica de las muestras	85
8.2.1 Análisis granulométricos y Químicos	90
8.3 Interpretación de tomografías eléctricas	91
8.4 Estimación de recursos.	93
8.4.1 Perfil Vía Horna	95
8.4.2 Perfil Quebrada Juan Baquero	96
8.4.3 Perfil Quebrada Aguazul	97
9. ANALISÍS DE RESULTADOS	99
9.1 Petrografía, granulometría y análisis químico.	99
9.2 Tomografías eléctricas de resistividad	100
9.3 Columnas Estratigráficas	102
9.3.1 Sección vía Horna:	102
9.3.2 Sección Quebrada Juan Baquero:	102
9.3.3 Sección Quebrada Aguazul:	103
9.4 Estimación del recurso	104
10. CONCLUSIONES	105
11. RECOMENDACIONES	107
12. BIBLIOGRAFÍA	108

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de Localización área de estudio.....	6
<b>Figura 2.</b> Mapa de vías en el título minero.....	7
<b>Figura 3.</b> Flujograma metodología empleada.....	14
<b>Figura 4.</b> Mapa modelo de elevacion digital.....	17
<b>Figura 5.</b> Mapa modelo de sombras. (Indicar la Fuente del DEM).....	18
<b>Figura 6.</b> Mapa de localización de tomografías.....	20
<b>Figura 7.</b> Mapa de localización columnas estratigráficas.....	22
<b>Figura 8. A.</b> equipo de adquisición. <b>B.</b> Línea tomográfica realizada.....	23
<b>Figura 9.</b> Flujograma procesamiento de la tomografía en el Software RES2DINV.....	25
<b>Figura 10.</b> Diagrama método de los perfiles. Modificado de (Bustillo y López, 1987).....	26
<b>Figura 11.</b> Arreglo Wenner-Schlumberger. Tomado de (Pérez, 2019).....	27
<b>Figura 12.</b> Mapa geológico y estructural regional. Fuente :Plancha 146 Medellín Occidental del SGC.....	34
<b>Figura 13.</b> Mapa geológico local. Fuente :Plancha 146- Medellín Occidental del SGC.....	37
<b>Figura 14.</b> Principales países productores de arena sílicea. Datos tomados (UPME, 2018). .....	38
<b>Figura 15.</b> Producción histórica Arena sílicea 2008-2017. Datos tomados (UPME, 2018)..	39
<b>Figura 16.</b> Producción global en Mt año 2018. Datos Tomados (UPME, 2018).....	40
<b>Figura 17.</b> Porcentaje de producción de los principales productores en el año 2018 Datos Tomados (UPME, 2018).....	40
<b>Figura 18.</b> Proyección producción Mundial 2020-2035. Datos tomados (UPME,2018).....	41
<b>Figura 19.</b> Porcentajes del consumo de arena sílice por uso a nivel mundial. Datos tomados (Upme, 2018).....	42
<b>Figura 20.</b> Consumo de arenas síliceas por país. Datos tomados de (UPME, 2018). .....	42
<b>Figura 21.</b> Proyección Consumo Mundial 2020-2035.Datos tomados (UPME, 2018). .....	43
<b>Figura 22.</b> Principales productores a nivel nacional 2012-1018. Datos tomados de (UPME, 2018). <a href="http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/arenassiliceas.aspx">http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/arenassiliceas.aspx</a>	44
<b>Figura 23.</b> Producción Nacional de Arenas Síliceas en m3 2012-2018. Datos tomados de <a href="http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/arenassiliceas.aspx">http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/arenassiliceas.aspx</a> . .....	45
<b>Figura 24.</b> Consumo de arena sílice en el departamento de Antioquia 2012-2018. Datos tomados de <a href="http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/arenassiliceas.aspx">http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/arenassiliceas.aspx</a> .....	46
<b>Figura 25.</b> Columna estratigráfica de la sección Vía Horna. (Ver Anexo 6).....	57
<b>Figura 26.</b> Nivel de lodolitas y mantos de carbón <b>A.</b> Capa de Lodolita representativa de la sección Vía Horna <b>B.</b> Capa de carbón de la sección vía Horna. ....	58
<b>Figura 27.</b> Columna estratigráfica de la sección vía Horna capas 2,4 y 6 <b>A.</b> Afloramiento representativo capa 4 <b>B.</b> Afloramiento representativo de los primeros metros de la sección (0-3,5 m).....	59

<b>Figura 28.</b> Columna estratigráfica de la sección vía Horna capas 2,4 y 6 <b>A.</b> Afloramiento representativo capa 4 <b>B.</b> Afloramiento representativo de los primeros metros de la sección (0-3,5 m).....	60
<b>Figura 29.</b> Columna estratigráfica sección vía Horna capas de la 17 a la 22. <b>A)</b> Arenisca con fragmentos líticos capa 22 <b>B)</b> Afloramiento arenisca capa 18.....	61
<b>Figura 30.</b> Columna estratigráfica Quebrada Juan Baquero. (Ver anexo 6). ....	63
<b>Figura 31.</b> Lodolitas de la sección Quebrada Juan Baquero. <b>A)</b> Capa de Lodolita al tope sección <b>B)</b> Capa de Lodolita en la parte media de la sección <b>C)</b> Capa de Lodolita en la base de la sección.....	64
<b>Figura 32.</b> Mantos de Carbón Quebrada Juan Baquero. <b>A)</b> capa de carbón base de la sección. <b>B)</b> Capa de carbón parte media de la sección. ....	65
<b>Figura 33.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 1 a la 5. Afloramiento de los primeros metros de la sección. ....	66
<b>Figura 34.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 7 a la 9 y Afloramiento arenisca capa 9. ....	67
<b>Figura 35.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 11 a la 15. <b>A)</b> Afloramiento de las capas 11 a la 15. <b>B)</b> Arenisca capa 13.....	68
<b>Figura 36.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 17 a la 24 y Arenisca capa 23.....	69
<b>Figura 37.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 28 a la 34. <b>A)</b> Afloramiento arenisca capa 29 <b>B)</b> Arenisca capa 33. ....	70
<b>Figura 38.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 36 a la 39. <b>A)</b> Afloramiento arenisca capa 36 <b>B)</b> Afloramiento arenisca capa 38.....	71
<b>Figura 39.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 43 a la 55. <b>A)</b> Afloramiento arenisca capa 43 <b>B)</b> Afloramiento arenisca capa 50.....	72
<b>Figura 40.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 60 a la 67. ....	73
<b>Figura 41.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 69 a la 72. <b>A)</b> Afloramiento arenisca capa 71 <b>B)</b> Afloramiento arenisca capa 69.....	74
<b>Figura 42.</b> Columna estratigráfica Quebrada Aguazul. (Ver anexo 6). ....	76
<b>Figura 43.</b> Lodolitas representativas Quebrada Aguazul <b>A)</b> Lodolitas masivas del tope de la sección <b>B)</b> Lodolitas fracturadas de la parte media de la sección. ....	77
<b>Figura 44.</b> Carbón representativos Quebrada Aguazul <b>A)</b> Afloramiento capa de carbón al tope de la sección <b>B)</b> Afloramiento capa de carbón de la parte media de la sección. ....	78
<b>Figura 45.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 1 a la 8. <b>A)</b> Afloramiento arenisca capa 3 <b>B)</b> Afloramiento capas 2,3 y 4. ....	79
<b>Figura 46.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 10 a la 14. <b>A)</b> Afloramiento arenisca capa 10. <b>B)</b> Afloramiento arenisca capa 12. ....	80
<b>Figura 47.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 16 a la 19 y afloramiento arenisca capa 16. ....	81
<b>Figura 48.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 21 a la 36. <b>A)</b> Afloramiento arenisca capa 22. <b>B)</b> Afloramiento arenisca capa 28. ....	82
<b>Figura 49.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 37 a la 47. <b>A)</b> Afloramiento arenisca capa 37. <b>B)</b> Afloramiento arenisca capa 42. ....	83

<b>Figura 50.</b> Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 49 a la 52 y Afloramiento de la arenisca capa 51. ....	84
<b>Figura 51.</b> Diagrama ternario de clasificación composicional de areniscas; según (Pettijohn et al.1987).....	86
<b>Figura 52.</b> Las muestras se encuentran compuestas principalmente por cuarzo monocristalino con extinción ondulatoria (Qmo), cuarzo monocristalino con extinción recta (Qmr), cuarzo policristalino (Qpd), fragmentos líticos cuarzo tipo chert (Qc), feldespatos (Fd) y plagioclasas (Pl). Muestra HL 3.1 recolectada en la sección estratigráfica vía Horna (figura A-B), definida composicionalmente como Subarcosa; Muestra HL 007 recolectada en la sección quebrada Juan Baquero, definida composicionalmente como Sublitoarenita (Figura C-D); Muestra HL 007 recolectada en la sección quebrada Aguazul, definida composicionalmente como Sublitoarenita (Figura E-F).....	87
<b>Figura 53.</b> Diagrama ternario textural de areniscas; según (Folk, 1954).....	89
<b>Figura 54.</b> Pseudosección de la tomografía de resistividad eléctrica. ....	92
<b>Figura 55.</b> Interpretación tomografía de resistividad eléctrica realizada en la zona de estudio. ....	93
<b>Figura 56.</b> Mapa de localización de perfiles. ....	94
<b>Figura 57.</b> Corte geológico sección Vía Horna. ( Ver anexo 7).....	95
<b>Figura 58.</b> Corte geológico sección quebrada Juan Baquero. ....	96
<b>Figura 59 .</b> Corte geológico sección quebrada Aguazul. ....	97
<b>Figura 60.</b> Tomografía interpretada con posible evidencia de escalones.....	101

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Coordenadas del polígono de estudio (Magna Sirgas Oeste).....	6
<b>Tabla 2.</b> Actividades económicas primarias y secundarias, municipio de Ebéjico.....	8
<b>Tabla 3.</b> Diseño de tomografías de resistividad. ....	20
<b>Tabla 4.</b> Composición modal de las arenas silíceas para los diferentes tipos de vidrio, tomado de (Secretaria de Economía, 2013). ....	48
<b>Tabla 5.</b> Tamaños límites de grano para la fabricación de vidrio. Tomado de (Secretaria de Economía, 2013). ....	49
<b>Tabla 6.</b> Características físicas, granulométricas y químicas para las arenas empleadas en la industria de la fundición, tomado de (Indusilika S.A.S, 2017). ....	50
<b>Tabla 7.</b> Características físicas, granulométricas y químicas para las arenas empleadas en la industria de la pintura. Tomado de (Indusilika S.A.S, 2017).....	51
<b>Tabla 8.</b> Características físicas, granulométricas y químicas para las arenas empleadas en la industria de la construcción (Hormigones), tomado de (Indusilika S.A.S, 2017). ....	52
<b>Tabla 9.</b> Características físicas, granulométricas y químicas para las arenas empleadas en la industria de fracturación hidráulica, tomado de (Benson y Wilson, 2015). ....	53
<b>Tabla 10.</b> Precios de arena silícea de la empresa ingeniera gravas y arenas C.I en Ricaurte Cundinamarca.....	55
<b>Tabla 11.</b> Precios de arena silícea de la empresa Indusilika en Bello Antioquia. ....	56
<b>Tabla 12.</b> Código, facies e interpretación de estas. Modificado de (Moreno y Corena, 2019).....	61
<b>Tabla 13.</b> Código, facies y interpretación de estas. Modificado de (Moreno y Corena, 2019). ....	74
<b>Tabla 14.</b> Código, facies y interpretación de estas. Modificado de (Moreno y Corena, 2019). ....	84
<b>Tabla 15.</b> Resultados clasificación composicional. ....	85
<b>Tabla 16.</b> Resultados del conteo de clasificación textural. ....	89
<b>Tabla 17.</b> Análisis granulométrico muestra A053.....	90
<b>Tabla 18.</b> Análisis químico muestra A053.....	90
<b>Tabla 19.</b> Análisis granulométrico muestra A055.....	91
<b>Tabla 20.</b> Análisis químico muestra A055. ....	91
<b>Tabla 21.</b> Correlación entre valores de resistividad y litologías. Modificado de (Ortega, 2018). ....	92
<b>Tabla 22.</b> Volumen de recursos presentes en la vía Horna.....	95
<b>Tabla 23.</b> Volumen de recursos presentes en la quebrada Juan Baquero.....	96
<b>Tabla 24.</b> Volumen de recursos presentes en la quebrada Aguazul.....	98
<b>Tabla 25.</b> Porcentaje de sílice obtenido para las muestras A-053 y A-055.....	100

## **LISTA DE ANEXOS**

**Anexo 1.** Estaciones realizadas en campo (Libreta digital en Excel)

**Anexo 2.** Formato de análisis de muestras.

**Anexo 3.** Tabla de datos de la tomografía eléctrica

**Anexo 4.** Tabla de precios y empresas consumidoras en Antioquia.

**Anexo 5.** Análisis químico y granulométricos.

**Anexo 6.** Columnas Estratigráficas escala 1:50.

**Anexo 7.** Perfiles de las secciones.

**Anexo 8.** Mapas en formato PDF.

## RESUMEN

La empresa RECO Minerales S.A.S opera en el municipio de Ebéjico, Antioquia, un título minero en el cual afloran arenas con alto contenido de sílice pertenecientes a la Formación Amagá; por lo tanto, conocer sus características petrográficas y volumétricas es fundamental para llevar a cabo un futuro aprovechamiento económico.

Durante la ejecución de este proyecto se llevaron a cabo nueve salidas de campo, en las cuales se realizó un levantamiento estratigráfico y muestreo de tres secciones estratigráficas que afloran en la vía Horna, en la Quebrada Juan Baquero y en la Cañada Azul. Se realizaron, además, cuatro tomografías eléctricas de resistividad compuestas, con las cuales se logró identificar una zona con un espesor de aproximadamente 35 m con valores de resistividad entre  $40,5 \Omega \cdot m$  y  $94,3 \Omega \cdot m$  asociado a areniscas con intercalaciones de lodolita, considerándose esta zona de gran interés económico.

A partir del muestreo de areniscas se seleccionaron y analizaron tres muestras en el microscopio petrográfico, logrando identificar valores composicionales de cuarzo superiores a un 80%. Por otra parte, los análisis granulométricos y químicos proporcionados por la empresa RECO Minerales S.A.S permitieron definir la posible implementación de las areniscas que afloran en el título, en sectores de la industria tales como: microcemento, placas corona, fundición, pegantes, entre otros.

Como resultado del levantamiento de las columnas estratigráficas y de los datos estructurales tomados en campo, se hizo una estimación de los recursos utilizando el método de perfiles o cortes, obteniendo un dato de volumen para los recursos de **8.893.335 m<sup>3</sup>**.

Todo lo anterior indica que, debido a las características mineralógicas, granulométricas, químicas y volumétricas de las areniscas del título, son favorables para un posible aprovechamiento económico en la industria.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de los minerales para uso industrial, principalmente las arenas silíceas, han aumentado durante los últimos años en países como Estados Unidos y China. La explotación de estas arenas se lleva a cabo en todo el mundo y representa el mayor volumen de extracción de materiales sólidos a nivel mundial. Su importancia radica en que estas materias primas corresponden aproximadamente entre un 70 a 80 % de los 50.000 millones de toneladas de materiales que se extraen cada año (Vásquez y Ramos, 2018), siendo estas empleadas en: cerámica, metalurgia, fundición, construcción, industria del petróleo, electrónica (Bustillo, 1989) y por último, en la fabricación de vidrio, del cual un 18% es usado para la fabricación de vidrio plano y un 39% para la fabricación de "vidrio hueco" o de botellería (Rincón, 2005).

A nivel global se presentan diferentes estudios enfocados en la caracterización de areniscas, donde destaca el trabajo de Varas et al. (2002), el cual realizó un estudio en el que se caracterizaron areniscas de uso ornamental en áreas aledañas a Ciudad Rodrigo, España. También, Sundararajan et al. (2009) evaluaron el potencial de explotación de areniscas silíceas de tonalidad blanca en el estado de Gujarat, en la India. Posteriormente, Costafreda et al. (2012) propusieron la caracterización de yacimientos de arenisca y sus posibles usos en Guinea-Ecuatorial.

En un contexto más local, Quintero (2014) llevó a cabo una caracterización fisicoquímica de rocas ricas en cuarzo en el municipio la Playa de Belén (Norte de Santander). Con el fin de conocer su potencial para ser explotadas, en el municipio de Melgar, departamento del Tolima, Cubides (2014) propuso un método de explotación de areniscas silíceas para ser implementadas como material de construcción. Por otra parte, Álvarez (2016) realizó una sectorización de bloques de areniscas para explotación, en un título minero ubicado en el departamento de Cundinamarca.

Por último, cabe destacar el trabajo realizado por Silva et al. (2008), en el que, a partir de columnas estratigráficas y estudios petroquímicos, analizaron el contenido de cuarzo en areniscas pertenecientes al miembro inferior, medio y superior de la Formación Amagá. Uno de los trabajos con mayor relevancia es el realizado por Maya (2006), en el cual se identificaron zonas potenciales para explotación de arenas silíceas con el fin de ser utilizadas como material de construcción, también se agruparon en tres tipos diferentes de depósitos siendo estos: estratificados, no consolidados y de macizos rocosos.

El mercado de las areniscas silíceas a nivel mundial y nacional ha venido en aumento debido a sus diferentes empleos tales como: vidrio, cerámica, fracturación hidráulica, entre otras. Además de esto, dependiendo de la calidad presentan un potencial económico favorable. La empresa RECO Minerales S.A.S posee un contrato de concesión minera en el municipio de Ebéjico-Antioquia, por lo cual se hace necesario realizar un estudio detallado que nos permita conocer las características petrográficas, distribución y cuantificación del recurso.

Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo principal, definir las características petrográficas y volumétricas de las areniscas presentes en el depósito y su potencial económico, correspondientes a un título minero de 81 Ha ubicado en Ebéjico, Antioquia. En este depósito afloran los miembros inferior y medio de la Formación Amagá, conformados por una intercalación de areniscas y lodolitas, acompañadas de mantos de carbón (Henoa, 2012).

# **1.GENERALIDADES**

## **1.1 Objetivo general**

Definir las características petrográficas y variaciones volumétricas de las areniscas presentes en el área de estudio para establecer su potencial económico.

## **1.3 Planteamiento del problema**

El mercado de las areniscas silíceas a nivel mundial y nacional ha venido en aumento debido a sus diferentes empleos tales como vidrio, cerámica, fracturación hidráulica, entre otras. La empresa RECO Minerales S.A.S. tiene un contrato de concesión minera en el municipio de Ebéjico-Antioquia, en el cual se tiene un conocimiento general del área, por lo cual, es necesario realizar un estudio geológico de mayor detalle que permita conocer la calidad del recurso y su cuantificación.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Recopilar, evaluar y analizar la información secundaria geológica, geofísica y estructural disponible sobre la zona de estudio.
- Conocer el estado del mercado de las arenas silíceas en la región y el mundo sobre los siguientes aspectos: demanda, usos y especificaciones de las arenas silíceas.
- Definir la distribución, estructuras y espesores de las capas de areniscas, arcillolitas y demás expuestas en el área.
- Determinar la calidad de las arenas silíceas encontradas en la zona de estudio, por medio de la petrografía de secciones delgadas.
- Determinar las características de resistividad de las litologías presentes en el depósito mineral.
- Determinar el volumen de areniscas presentes en el título.

#### **1.4 Pregunta de investigación**

¿Las características petrográficas y el volumen presentes en las areniscas que afloran son favorables para llevar a cabo un aprovechamiento económico del recurso?

#### **1.5 Hipótesis**

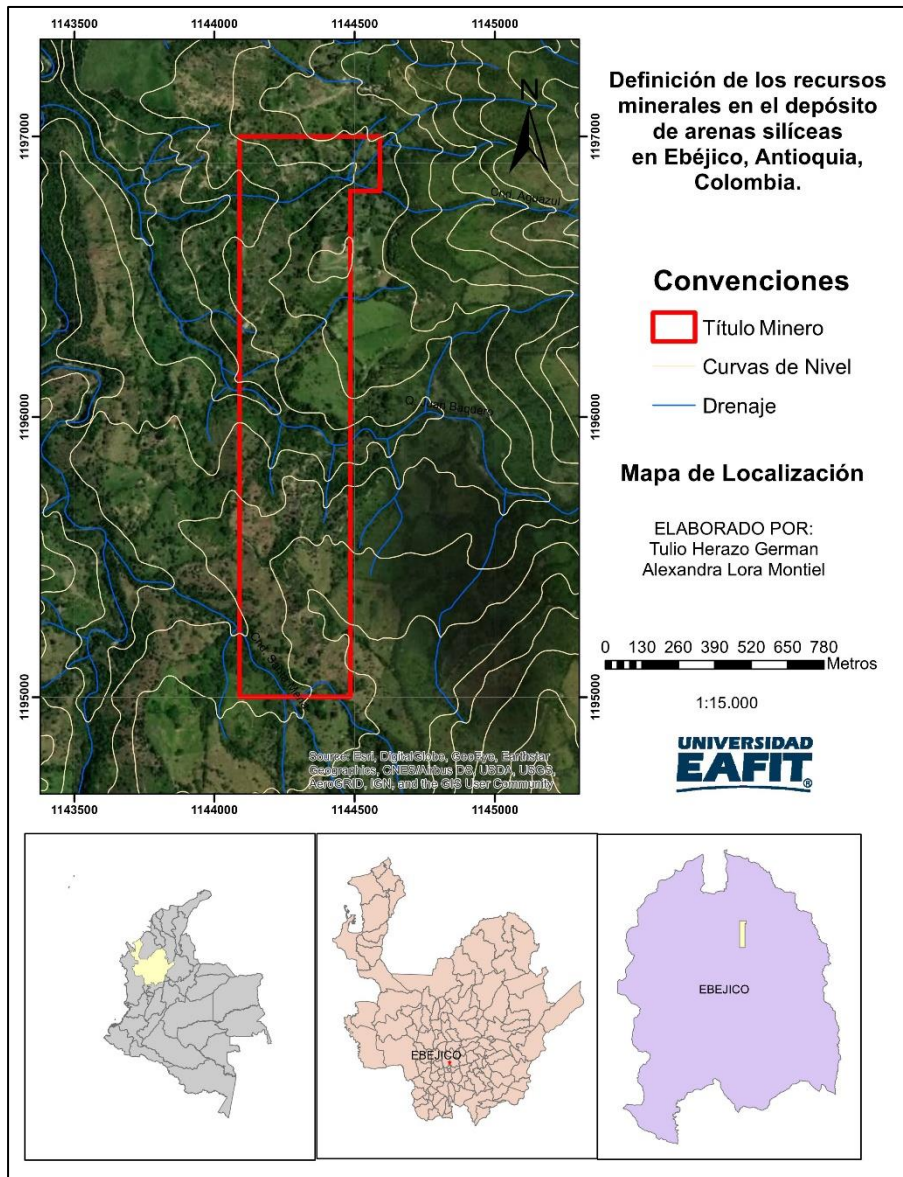
Las areniscas del depósito mineral de Ebéjico presentan características mineralógicas y volúmenes considerables para tener un potencial económico favorable en la industria.

### **2. ZONA DE ESTUDIO**

#### **2.1 Localización del área de estudio**

El área de estudio se encuentra en el municipio de Ebéjico, el cual está localizado en la región occidental del departamento de Antioquia, limitado por el Norte con los municipios de Santa Fe de Antioquia, Sopetrán y San Jerónimo; por el Oriente con los municipios de San Jerónimo y Medellín; por el Sur con Heliconia y Armenia; y por el Occidente con el municipio de Anzá; su cabecera dista 42 Kilómetros de la ciudad de Medellín (Figura 1).

La zona de estudio se encuentra en las veredas el Limonar, Filo San José y Guayabal, en jurisdicción del municipio de Ebéjico, sector ubicado en la plancha 146-IB2, escala 1:10.000 del IGAC; esta zona se define por un polígono de aproximadamente 81 ha limitado por las siguientes coordenadas (Tabla 1).



**Figura 1.** Mapa de Localización área de estudio.

**Tabla 1.** Coordenadas del polígono de estudio (Magna Sirgas Oeste).

Punto	X	Y
1	1.197.000	1.144.100
2	1.197.000	1.144.600
3	1.196.805	1.144.600
4	1.196.805	1.144.495
5	1.195.000	1.144.495
6	1.195.000	1.144.100

## 2.2 Vías de acceso

El municipio de Ebéjico se encuentra ubicado a 42 km de Medellín, de los cuales, 13 kilómetros son carreteras destapadas y presenta una longitud vial de 84.5 km; 37 km son vías veredales y 47.5 km se encuentran pavimentadas. Tiene como vía principal la carretera Medellín–Santa Fe de Antioquia y una secundaria Ebéjico-Heliconia-Medellín (IGAC, 2012).

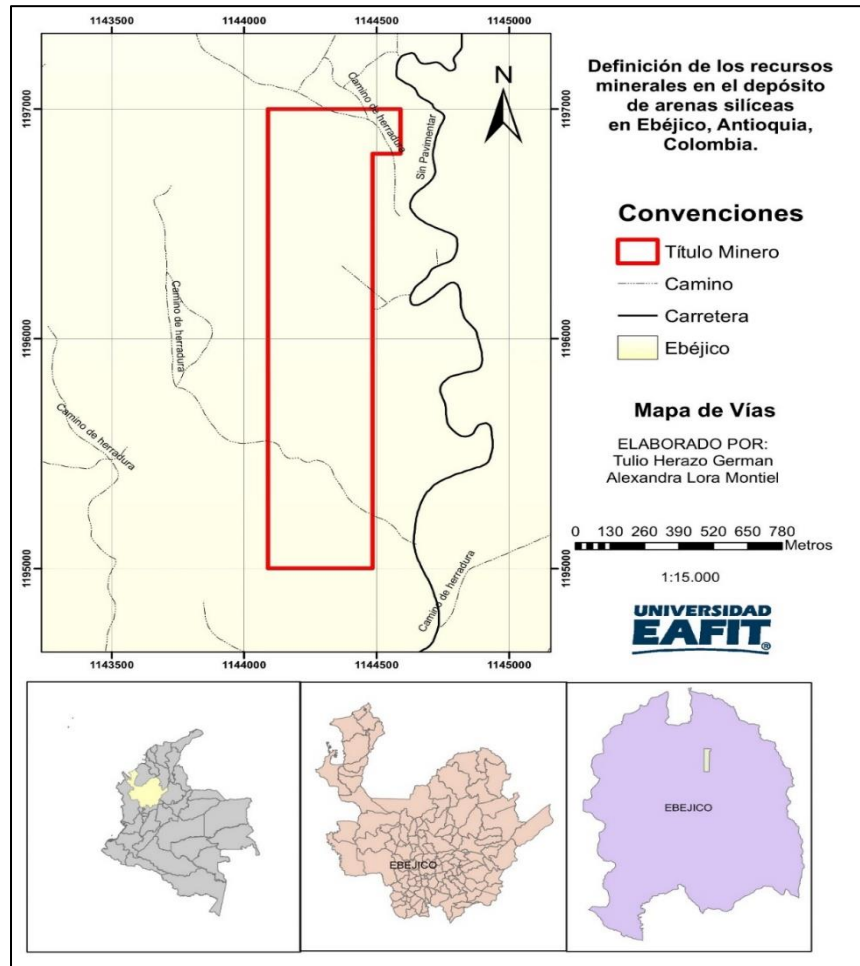


Figura 2. Mapa de vías en el título minero.

## 2.3 Población

El municipio de Ebéjico consta de 12.515 habitantes, distribuidos de la siguiente manera: 2.221 habitan en las cabeceras urbanas y 10.294 en el suelo rural, conformado por 6.140 hombres y 6.375 mujeres (Vásquez, 2016).

## 2.4 Clima

El municipio de Ebéjico generalmente presenta clima templado con una temperatura promedio de 23°C, siendo los meses más lluviosos mayo, octubre y noviembre con precipitaciones del orden de 225 mm/mes, y los meses secos de enero y febrero con precipitaciones de orden 60 mm/mes. El municipio presenta diferentes climas, cuya distribución en el territorio es de 79 km<sup>2</sup> con un clima cálido, 139 km<sup>2</sup> con clima templado y 17 km<sup>2</sup> con clima frío (Vásquez, 2016).

El título minero se encuentra en la parte norte de este municipio la cual presenta principalmente un clima cálido (Vásquez, 2016).

## 2.5 Actividad económica

Las actividades económicas del municipio de Ebéjico se basan principalmente en los sectores agrícola y pecuario, siendo las mayores fuentes de ingreso la producción de panela, el cultivo de plátano, café, cacao, porcicultura y la ganadería, siendo esta última la de mayor desarrollo en el área del título minero. Además de esto, existe una clasificación referente a la escala de producción categorizándolas entre primaria y secundaria (Palacios y Presiga, 2014), siendo estas:

**Tabla 2.** Actividades económicas primarias y secundarias, municipio de Ebéjico.

ESCALA PRIMARIA	ESCALA SECUNDARIA
Producción Ganadera Producción de Café Producción de caña Producción pecuaria Producción de árboles maderables	Producción de hortalizas y leguminosas Producción de frutales Producción de árboles maderables

El municipio de Ebéjico basa su economía en el sector primario, específicamente en el sector agrícola con los cultivos de café, caña y plátano establecidos en una extensión de 4.282.40 hectáreas aptas para cultivos y un área en producción de 3.929.40 hectáreas, para una producción de 10.075 toneladas y un rendimiento promedio de 2.564 kilos por hectárea. En el sector pecuario la ganadería bovina y la porcina; son las más importantes con 13.000 bovinos y 187.000 porcinos (Vásquez, 2016).

### **3. ANTECEDENTES**

#### **3.1 Estudios anteriores realizados en la Formación Amagá**

En el área de estudio afloran litologías pertenecientes a la Formación Amagá, por lo tanto, se enuncian algunos estudios realizados en esta localidad del municipio de Ebéjico y sus alrededores; los cuales incluyen información estratigráfica, petrográfica, estructural y geofísica. Estos estudios permiten tener una idea general de las diferentes litologías presentes en las secciones estratigráficas y, además, conocer las características composicionales de las areniscas.

Grosse (1926) describe la Formación Amagá como el Terciario Carbonífero de Antioquia, así mismo, con base en la presencia de mantos de carbón explotables lo dividen en dos miembros uno inferior y uno superior.

Van Der Hammen (1958), en la Estratigrafía del Terciario y Mastrichtiano y Tectogénesis de los Andes Colombianos, eleva esta unidad a Formación y la redefine como Formación Antioquia.

González (1980) realizó la cartografía geológica de las planchas 167 y 168 en los municipios de Sonsón y Salamina, por lo cual, con base en una sección en cercanías al municipio de Amagá, la renombro por primera vez como Formación Amagá y la subdivide en tres niveles: inferior, medio y superior. Además de esto, plantea que la Formación Amagá se originó producto de zonas de hundimiento a lo largo de la cordillera central en la cual se depositaron gruesas secuencias

sedimentarias de tipo continental.

Mejía (1984), en la memoria explicativa de las planchas 130 (Santa Fe de Antioquia) y 146 (Medellín Occidental), realiza una descripción general de características tales como: Geología regional, Geología local, geomorfología, geología estructural entre otras de la plancha 130 y 146, además de esto, describen los tres miembros pertenecientes a la Formación Amagá.

González (2001), en el mapa geológico del departamento de Antioquia escala 1:400000, presenta una descripción de las diferentes litologías que afloran en el departamento de Antioquia; igualmente, muestra un panorama del potencial minero de Antioquia y detallan cada uno de los miembros de la Formación Amagá separándola principalmente por la presencia de mantos explotables de carbón; además de esto, correlaciona esta unidad con la Formación Cauca superior.

Silva et al. (2001), en el artículo Estratigrafía secuencial de la Formación Amagá, con base en columnas estratigráficas y petrografía divide la Formación Amagá en dos miembros: Superior e Inferior los cuales, se diferencian principalmente por la composición de las areniscas.

Sierra et al. (2008), en *Tectonic and climate driven fluctuations in the stratigraphic base level of a Cenozoic continental coal basin, northwestern Andes*, presentan una evolución de la cuenca Amagá con base en los datos composicionales de las areniscas; Los autores indican que la Formación Amagá se superpone inconformemente con el basamento metamórfico paleozoico de la Cordillera Central de Colombia e infrayace sucesiones volcánicas cenozoicas tardías de las formaciones Combia e Irra.

Heno (2012), en Estratigrafía y petrografía de las areniscas de la secuencia quebrada la Naranjala, municipio de Fredonia, Miembro Inferior de la Formación Amagá, presenta un levantamiento estratigráfico en el cual, se determinan las diferentes facies y paleo-ambientes de depositación, correspondientes de base a

techo, ambientes fluviales continentales intermedios entre ríos trezados y meándricos.

Rojas y Salazar (2013), en el proyecto de grado denominado Estratigrafía secuencial y análisis integrado de procedencia de las Sedimentitas de la Formación Amagá en la sub-cuenca Santa Fe de Antioquia, realizaron un levantamiento de columnas estratigráficas en los municipios de Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo; además de esto implementaron petrografía de secciones delgadas con el fin de conocer la correlación y/o diacronismo con el registro sedimentológico de la sub-cuenca de Amagá-Venecia. Los autores determinaron que existe una correlación marcada en la sub-cuenca Santa Fe de Antioquia con la sub-cuenca Amagá-Venecia.

Lozano et al. (2014), dentro del estudio realizado en la cuenca de Amagá-Cauca-Patía (ACP), incluyen información de columnas estratigráficas, geología estructural, geofísica y geología regional. Estos autores definieron que la Formación Amagá presenta un potencial económico alto asociado principalmente a las grandes reservas de carbón y una posible presencia de hidrocarburos tipo gas.

Quijano (2014), en el estudio denominado Parámetros morfométricos, geomorfológicos y correlación estructural en cinco cuencas hidrográficas de la cuenca Amagá, presenta una correlación entre la dirección regional de los cauces y los sistemas de fallas regionales en cuencas hidrográficas pertenecientes a la Formación Amagá. El autor concluye que la cuenca presenta un basculamiento hacia el sur.

Piedrahita et al. (2017) en el artículo *Detrital zircon fission-track thermochronology and magnetic fabric of the Amagá Formation (Colombia): Intracontinental deformation and exhumation events in the northwestern Andes*, emplearon trazas de fisión en circones para definir la procedencia de la Formación Amagá. Estos autores, enmarcan la cuenca en un contexto geológico regional y estructural.

Finalmente, con base en las trazas de fisión, le asocian a la Formación Amagá una edad Oligoceno para el miembro inferior y Mioceno medio miembro superior.

Lara et al. (2018) en el artículo *Provenance of the cenozoic siliciclastic intramontane Amagá formation implications for the early miocene collision between central and South America*, con base en secciones estratigráficas, dataciones U-PB, petrografía y minerales pesados determinaron la proveniencia de la Formación Amagá. Para el miembro inferior las edades de circón y las modas composicionales sugieren una fuente de sedimentos asociada a la placa continental de América del sur y para el miembro superior, las fuentes de sedimentos se asocian tanto a la placa sudamericana como al bloque Panamá-Chocó.

Por otra parte, es importante mencionar algunos trabajos geofísicos realizados en la zona y sus alrededores, asimismo trabajos en los cuales se aplica métodos-geo eléctricos enfocados en caracterizar areniscas y depósitos en distintas zonas con influencia en la zona de estudio. A continuación, se hará un breve resumen de estos:

Sierra et al. (2011), en el estudio denominado *Petroleum Geology of Colombia*, se enfoca en la cuenca Amagá-Cauca- Patía en su geología y estructura, como insumo básico en la búsqueda de gas en la región de Amagá y en donde se aplicaron métodos gravimétricos y magnetométricos. Estudios magnéticos a 4750 m sobre el nivel del mar mostraron que los datos de anomalía de gravedad magnética y de Bouguer están bien correlacionados con el basamento pre-cretáceo ígneo-metamórfico. La anomalía de Bouguer con una densidad de 2,30 Grs / cc de densidad de Bouguer, también muestra una estrecha relación con los contrastes de densidad entre las secuencias terciarias y la base del cretáceo.

Ortega (2018) realizó en el sector Bellavista del municipio de Angelópolis, nueve Sondeos Eléctricos Verticales y una Tomografía Eléctrica de Resistividad con el objetivo de caracterizar geo-eléctricamente el Miembro Medio de la Formación Amagá, para reconocer mantos de carbón y galerías subterráneas secas, inundadas o desplomadas. Los autores identificaron 77 capas geoelectricas

agrupadas en dos cortes geo-eléctricos los cuales relaciona las resistividades en el subsuelo con las que se obtiene de una manera las correlaciones litológicas existentes y las intervenciones antrópicas (galerías subterráneas). También se lograron identificar cuatro grupos de resistividades diferentes, las cuales se asocian al Miembro Medio de la Formación Amagá y a las Metasedimentitas de la Sinifaná, encontrando el contacto entre estas dos.

## 4. METODOLOGÍA

En la siguiente figura 3, se muestra un diagrama de flujo con las respectivas fases o etapas planteadas en la ejecución de este proyecto.

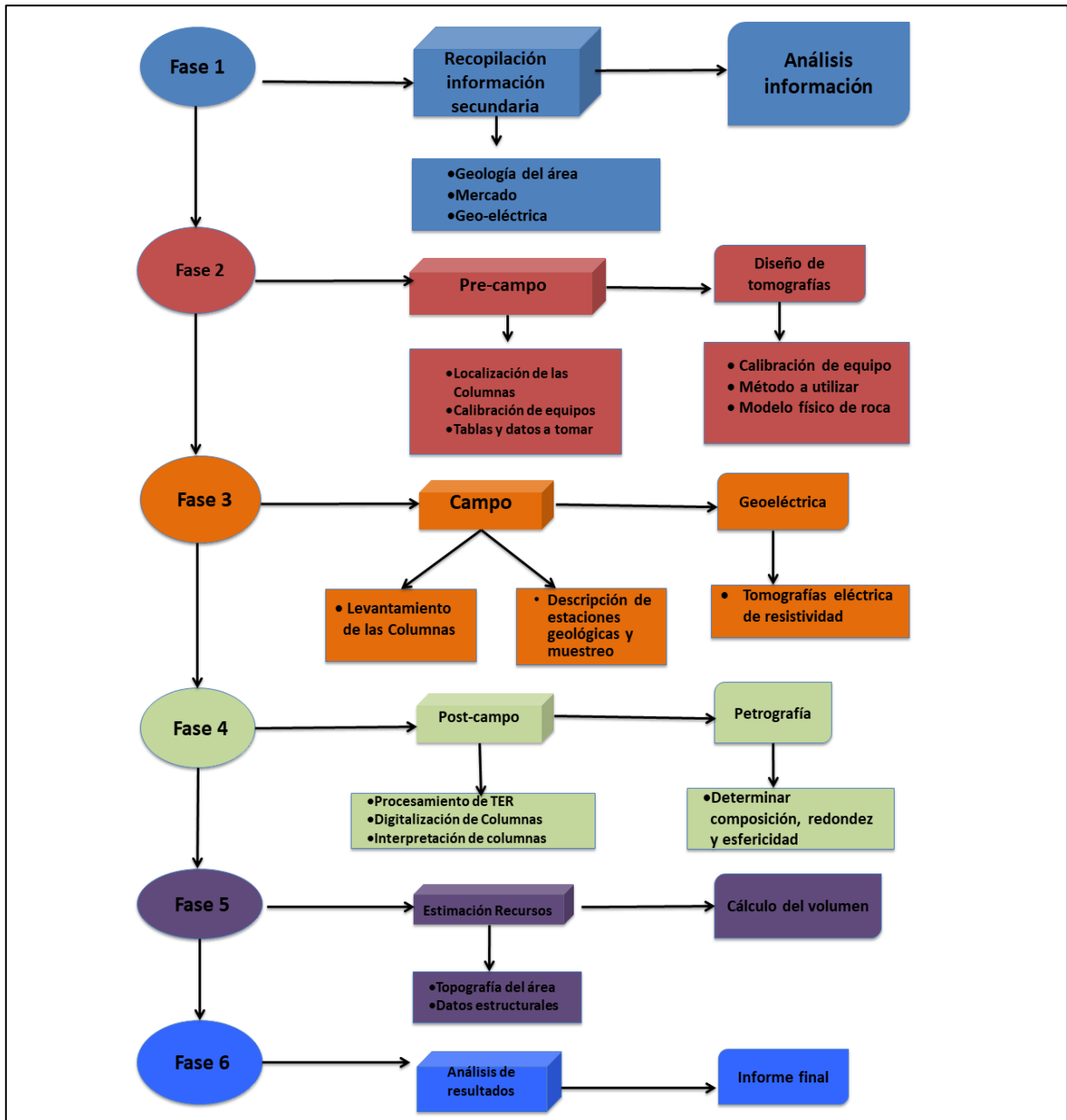


Figura 3. Flujograma metodología empleada.

#### **4.1 Recopilación de la información secundaria**

En la primera etapa, se realizó la recopilación y análisis de la información secundaria enfocados en estudios de areniscas pertenecientes a la Formación Amagá, siendo los trabajos más relevantes los realizados por Sierra et al. (2001) y Henao (2012), ya que incluyen columnas estratigráficas detalladas y realizan análisis petrográfico de muestras pertenecientes a la Formación en mención.

Además de esto, se revisaron bases bibliográficas referidas a estudios en los cuales, se aplicarán métodos de resistividad eléctrica orientadas a caracterizar depósitos de areniscas de los cuales, resaltan los trabajos desarrollados por Sierra et al. (2011) y Ortega (2018).

Adicionalmente, se utilizaron estudios orientados a la descripción petrográfica de areniscas, resaltando el estudio petrográfico elaborado por Silva et al. (2008) en el cual, con base en secciones delgadas de areniscas pertenecientes a la Formación Amagá, determinaron su composición.

Para conocer las especificaciones y los valores en el mercado de las arenas silíceas, se contactaron diferentes empresas a nivel nacional encargadas de procesar, distribuir, clasificar, evaluar y comercializar los diferentes tipos de arenas de acuerdo con sus características y/o empleos.

#### **4.2 Preparación del trabajo de campo.**

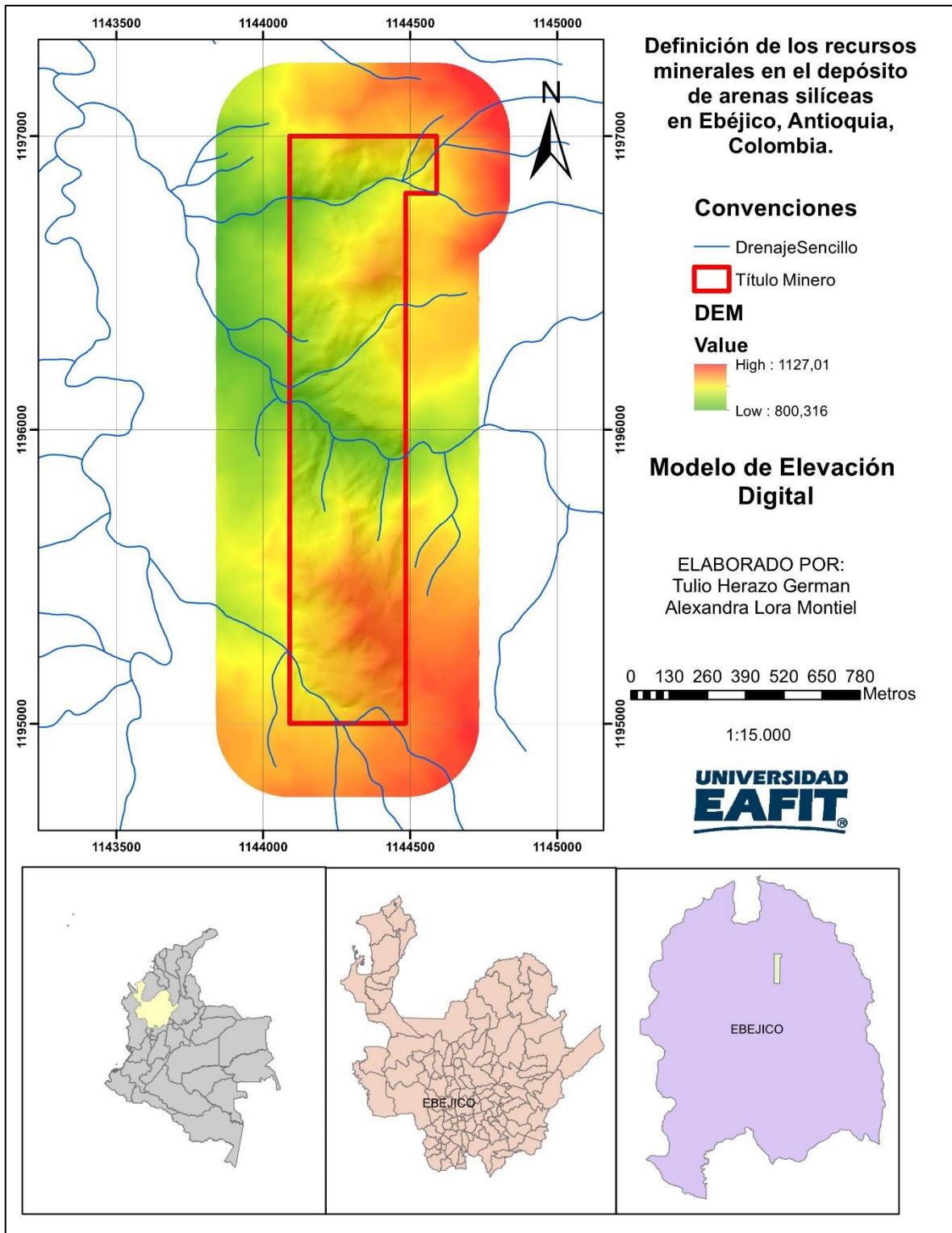
De manera preliminar, se realizó el reconocimiento del área, preparación de mapas, toma de información, protocolo para la toma de muestras, planeación de los recorridos y levantamiento de las columnas estratigráficas.

#### **4.2.1 Reconocimiento del área:**

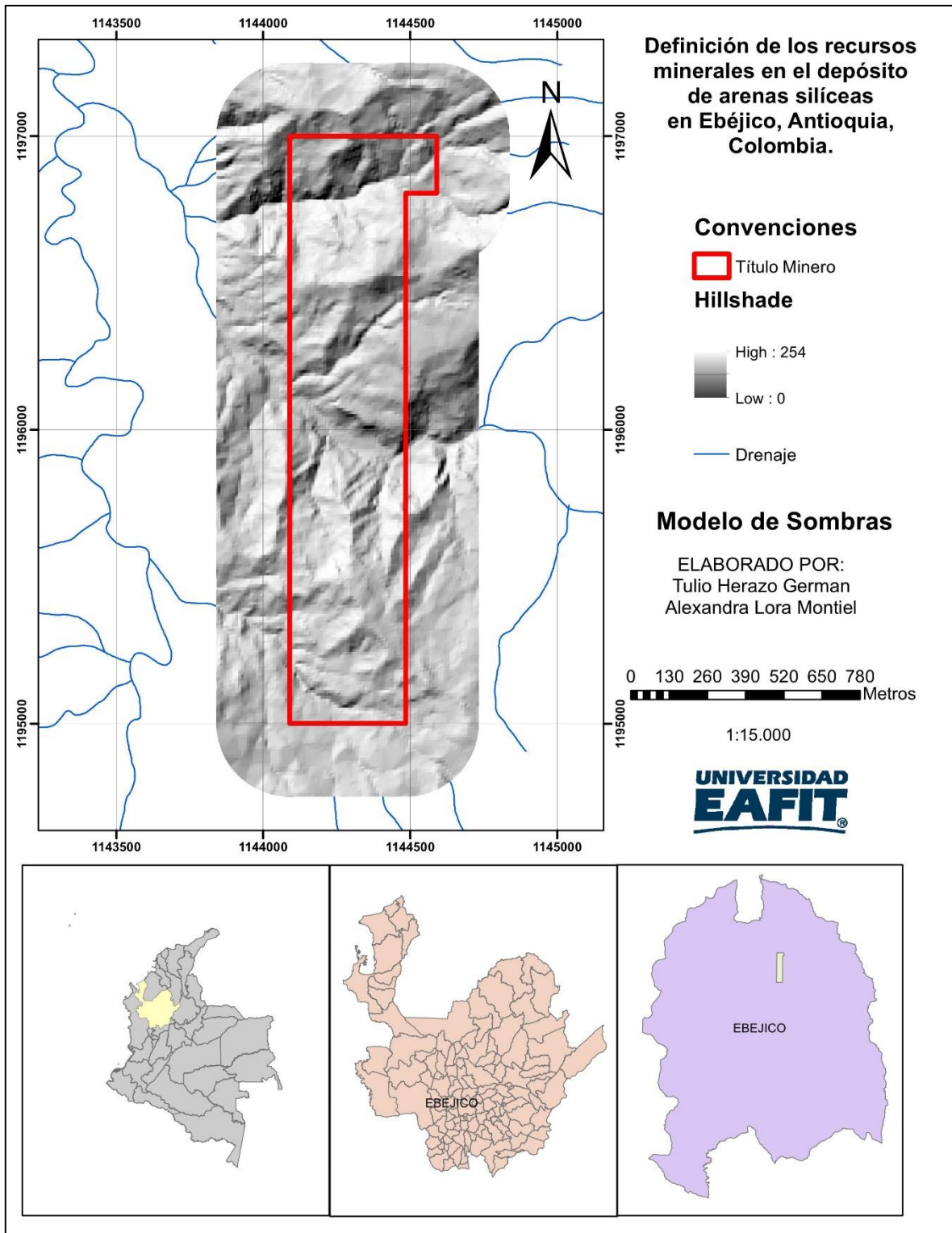
Se realizaron dos visitas de inspección y reconocimiento durante los meses de Julio y agosto, en las cuales se verificaron las facilidades de acceso a la zona y las posibles columnas estratigráficas a levantar.

#### **4. 2.2 Elaboración de mapas y toma de información:**

Los mapas se realizaron teniendo en cuenta la ortofoto del departamento de Antioquia, el Modelo de Elevación Digital con resolución de 1 metro (Figura 4) y un modelo de sombras (Figura 5), los cuales fueron los principales insumos utilizados para el desarrollo de los mapas en el software ARCGIS. Además de esto, se implementó el uso de tablas las cuales facilitaron la recolección de datos tales como: espesor, datos estructurales, estructuras internas y granulometría.



**Figura 4.** Mapa modelo de elevacion digital.Fuente IGAC.



**Figura 5.** Mapa modelo de sombras. Fuente IGAC.

#### **4.2.3 Protocolo para la toma de muestras:**

Para la toma de muestras en las diferentes capas de areniscas presentes en el área de estudio, se realizó una abertura de aproximadamente 20 cm de ancho por 20 cm de alto, la cual con la ayuda de una espátula se logró obtener una muestra fresca con poca contaminación.

#### **4.2.4 Planeación de recorridos:**

Estos se ejecutaron teniendo en cuenta el reconocimiento general del área, se dividió en aproximadamente 5 días de campaña de campo los cuales se detallan a continuación:

- Día 1: Levantamiento de columna Quebrada Juan Baquero
- Día 2: Continuación de la columna Quebrada Juan Baquero- Inicio quebrada Aguazul.
- Día 3: Columna vía Horna- estaciones de campo.
- Día 4: Continuación vía Juan Baquero- estaciones de campo.
- Día 5: Estaciones de campo.

#### **4.2.5 Levantamiento de columnas estratigráficas:**

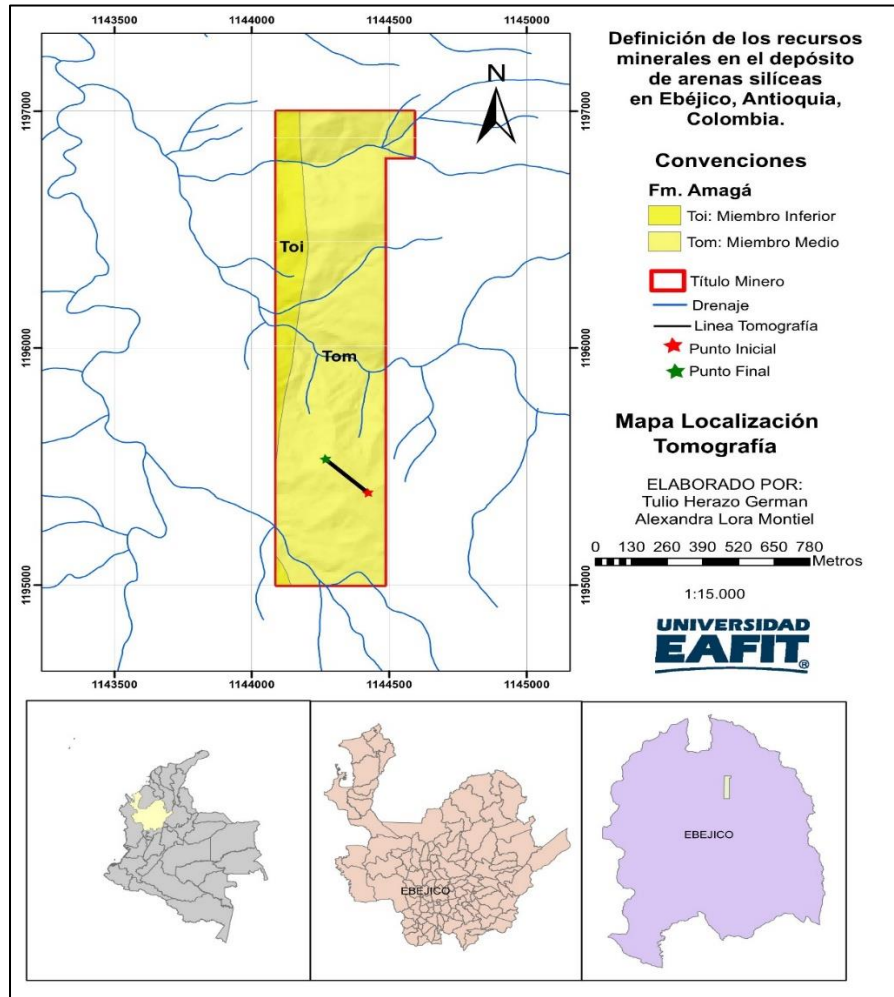
Se realizó el levantamiento de las columnas estratigráficas planeadas, teniendo en cuenta el formato implementado por el Servicio Geológico.

#### **4.2.6 Diseño de tomografías de resistividad**

Se definieron los sitios de interés en el área de estudio para la realización de las tomografías eléctricas de resistividad (TER); estos puntos se definieron teniendo en cuenta: topografía, vías de acceso, litología presente.

Con base en lo anterior, se planteó el desarrollo de una tomografía de resistividad eléctrica compuesta (Figura 6), con el fin obtener tanto resolución en la horizontal como a profundidad de investigación; se seleccionó el arreglo WENNER-

SCHLUMBERGER y en la siguiente tabla se denota la ubicación, dirección y longitud de las líneas (Tabla 3).



**Figura 6.** Mapa de localización de tomografías.

**Tabla 3.** Diseño de tomografías de resistividad.

N-TER	Coordenada Inicio	Coordenada Final	Dirección	Longitud
HL_1	1195321N - 1144412E	1195503N - 1144291E	NW-SE	232 m
HL_2	1195324N - 1144411E	1195502N - 1144300E	NW-SE	232 m
HL_3	1195319N - 1144414E	1195506N - 1144296E	NW-SE	232 m
HL_4	1195503N - 1144299E	1195506N - 1144293E	NW-SE	232 m

### **4.3 Trabajo de campo**

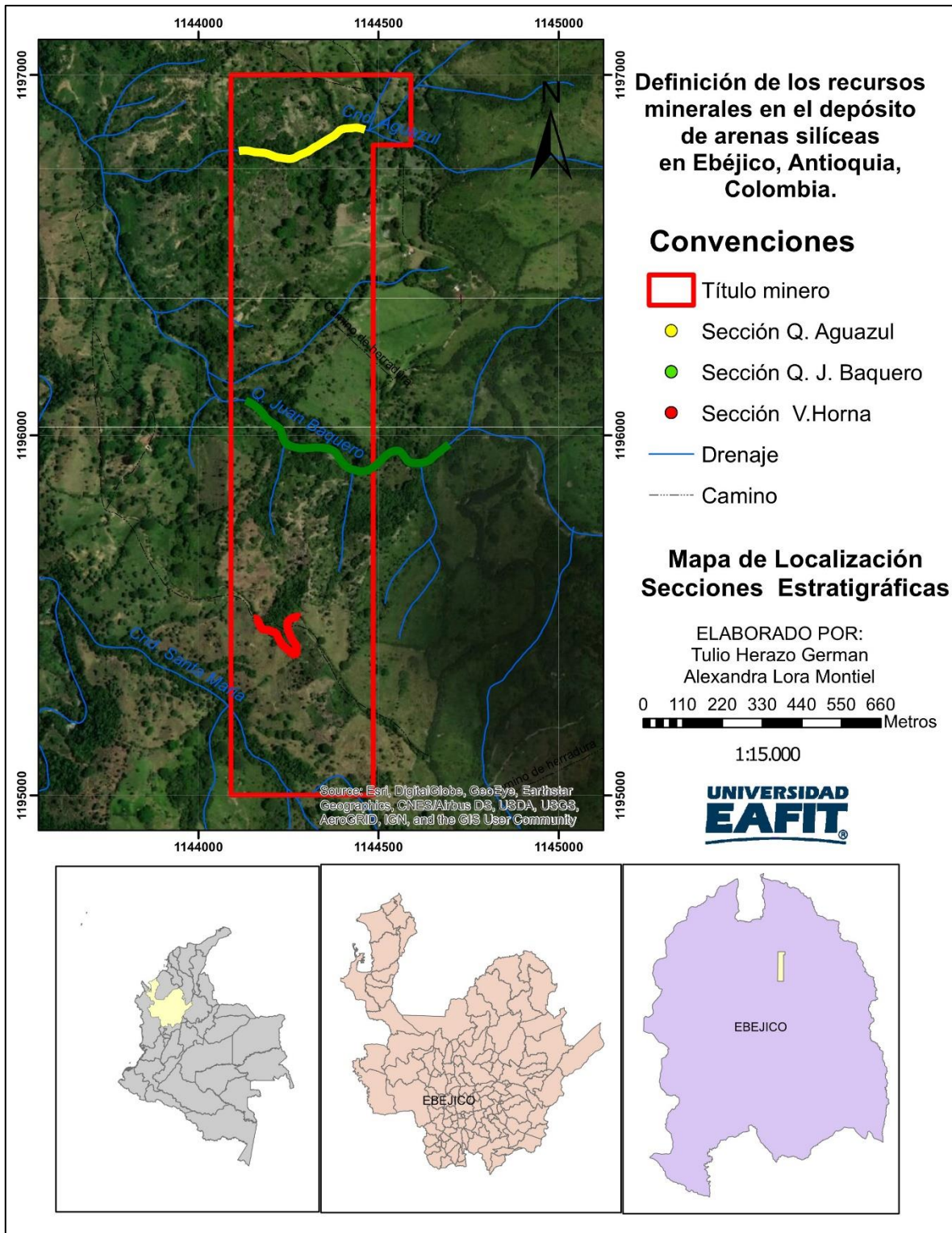
El trabajo de campo se realizó entre los meses de Julio, agosto, septiembre y octubre de 2019, el cual se dividió en las siguientes etapas:

En la primera etapa se hizo un reconocimiento general del área a trabajar, enfocados en conocer las principales vías de acceso, topografía, afloramientos, secciones estratigráficas a levantar, revisión de puntos predilectos para el desarrollo de las tomografías eléctricas, entre otras.

#### **4.3.1 Levantamiento de columnas estratigráficas y recolección de muestras**

En una segunda etapa, se realizó el levantamiento de las secciones estratigráficas (Figura 7), y la recolección de muestras sobre la Quebrada Juan Baquero, Quebrada Aguazul y la vía a Horna, realizados una escala 1:100. En éstas se tomaron datos estructurales, localización, espesor de las capas, litología, color y grado de meteorización. Además, se recolectaron doce muestras de areniscas a partir de las cuales se seleccionaron tres para análisis petrográfico.

Cabe destacar, que en el área de estudio se realizaron once estaciones geológicas adicionales al levantamiento de columnas, las cuales permiten tener un control estructural y litológico de las capas de areniscas presentes (Anexo 1); además de esto los datos fueron tomados con la Brújula Brunton estructural obteniendo datos en notación de Dip/Direction, los cuales posteriormente fueron a convertidos a con notación cuadrantes.



**Figura 7.** Mapa de localización columnas estratigráficas.

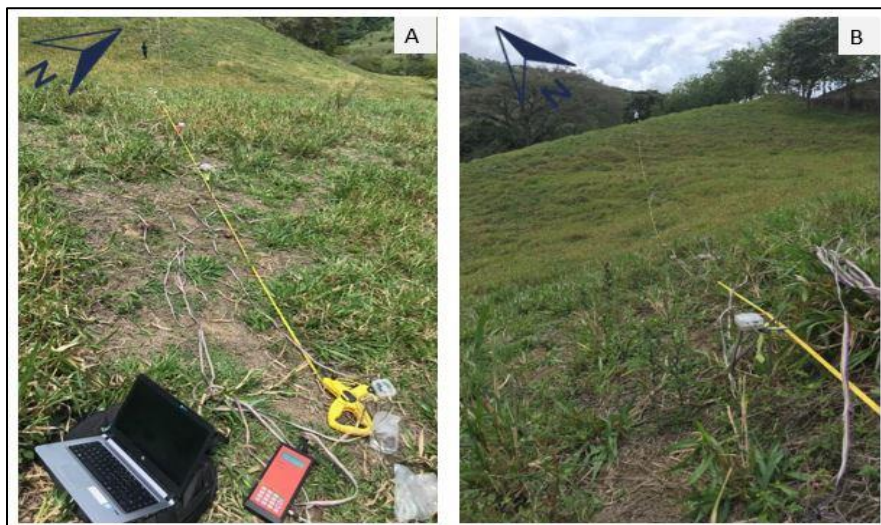
### 4.3.2 Adquisición de tomografías eléctricas de resistividad

Esta técnica proporciona conjuntamente información lateral y a profundidad del subsuelo. El sistema consta de un resistímetro o unidad básica, un selector de electrodos y un juego de cables multiconectores que permiten utilizar hasta un número determinado de electrodos conmutables de forma totalmente automática a través del selector de electrodos (Geonica, 2017).

La gran diferencia de la tomografía eléctrica respecto a los otros métodos convencionales radica en que, las medidas se realizan de forma automatizada, es decir, sin necesidad de mover manualmente ningún electrodo (Serrano, 2003).

Finalmente, se llevó a cabo la ejecución de las tomografías de resistividad eléctrica (TER), las cuales se realizaron con una separación de 8 metros entre los electrodos superponiéndose las siguientes: cada 2 m respecto a la anterior, cubriendo una distancia de 232 m en cada una de ellas; el proceso para la toma de datos se detalla a continuación:

- Localización de la tomografía (TER)
- Extensión de la cinta métrica
- Instalación de electrodos
- Instalación de la línea
- Adquisición de datos



**Figura 8. A.** Equipo de adquisición. **B.** Línea tomográfica realizada.

#### **4.4. Trabajo Post-campo.**

##### **4.4.1 Análisis petrográfico**

Se seleccionaron y analizaron tres muestras de areniscas pertenecientes a la Quebrada Juan Baquero, Quebrada Aguazul y vía Horna. Esta selección se realizó teniendo en cuenta la distribución de las capas en el área, espesor de la capa, tonalidad de la muestra, grado de consolidación y tamaño de las partículas, con el fin de caracterizar las diferentes capas que afloran en el título y obtener resultados confiables de las muestras.

Además, teniendo en cuenta el formato para análisis de muestras planteado por el Servicio Geológico Colombiano, se llenó la respectiva información y observaciones de las muestras (Anexo 2). Por último, para la clasificación textural de las muestras se implementó la propuesta establecida por Folk (1954), en la cual se grafican los datos normalizados del conteo en un triángulo cuyos extremos representan tres categorías diferentes de tamaño de grano siendo estos arena, lodo y limo; mientras que, para la clasificación composicional, se utilizó el triángulo Q-F-L planteado por Pettijohn et al. (1987).

##### **4.4.2 Procesamiento e inversión de datos**

Para llevar a cabo el procesamiento de los datos, se implementó el software Excel con el fin de organizar los respectivos datos, asignarle los valores de topografía, corregir el espaciamiento y realizar la superposición de las 4 líneas. Estos se pasaron a un block de notas para guardar el archivo como .dat, siendo este el formato con el cual trabaja el software RESD2INV (Figura 9), utilizado para obtener valores de resistividades reales con base en las resistividades aparentes obtenidas en campo. En el anexo 3, se presentan los datos tomados en campo de las diferentes tomografías.

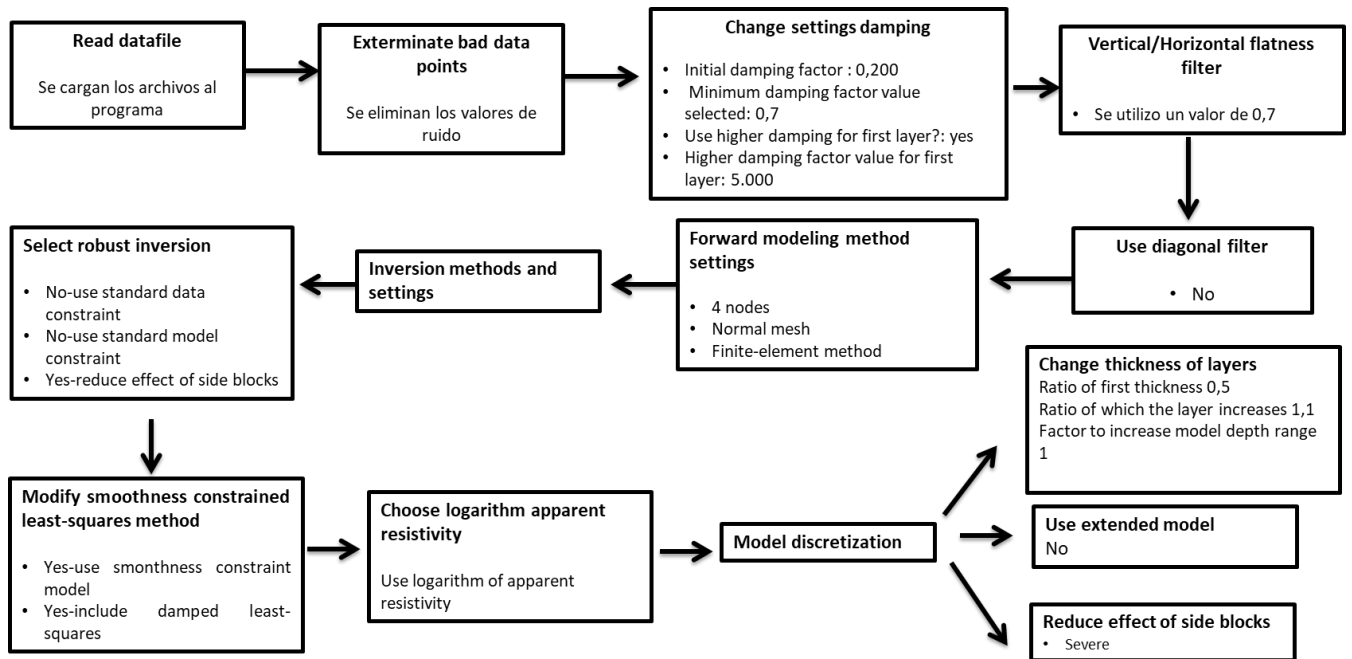


Figura 9. Flujograma procesamiento de la tomografía en el Software RES2DINV.

#### 4.4.3 Elaboración de columnas estratigráficas

Las tres columnas estratigráficas fueron digitalizadas implementando el software R usando la herramienta SDAR planteado por Ortiz et al. (2015).

#### 4.4.4. Estimación de recursos

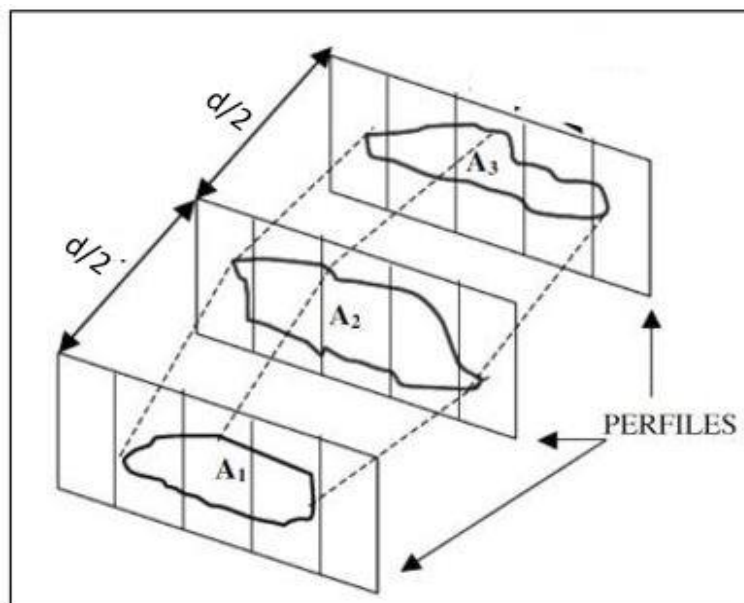
Para la realización del cálculo de recursos del yacimiento, se implementó el método de los perfiles (Figura 10), el cual es uno de los más utilizados debido a que tiene en cuenta, de manera completa, las particularidades de la constitución geológica del yacimiento, la morfología y las condiciones de los cuerpos minerales (Lepin y Arisosa, 1968).

La elección de este método se realizó teniendo en cuenta las diferentes estaciones y columnas estratigráficas realizadas en campo, las cuales evidencian una posible continuidad de las capas a lo largo del título minero.

Para llevar a cabo la estimación, se tiene en cuenta principalmente la información geológica recolectada en campo y con base en esto, se realizan los perfiles interpolando las capas entre las secciones más cercanas (figura 10).

El procedimiento para llevar a cabo este método de estimación de recursos fue el siguiente:

1. Teniendo en cuenta el área donde se tiene información geológica, se realiza el perfil topográfico para cada corte.
2. Se dibujan las capas dentro del perfil topográfico con su respectivo espesor y buzamiento.
3. Se calculan las áreas para las capas del perfil.
4. Se calcula la distancia media entre los perfiles.
5. Se calculan los volúmenes individuales de las capas por perfiles, multiplicando el área de cada capa por la distancia media.
6. Se calculan los recursos totales multiplicando el volumen del material por la densidad.



**Figura 10.** Diagrama método de los perfiles. Modificado de Bustillo y López (1987).

## 5. MARCO TEÓRICO

En esta capítulo se definirán los términos y conceptos técnicos utilizados a lo largo del documento, los cuales tienen como objetivo brindarle al lector un conocimiento general de los temas tratados.

**Título minero:** Se define como el acto administrativo escrito mediante el cual, la ANM (Agencia Nacional de Minería) le otorga a un tercero el derecho a explorar o explotar el suelo y el subsuelo minero propiedad de la nación (ANM, 2001).

A partir de la vigencia del Código minero (Ley 685 del 2001), únicamente se podrá constituir, declarar y probar el derecho a explorar y explotar minas de propiedad estatal, mediante el contrato de concesión minera, debidamente otorgado e inscrito en el Registro Minero Nacional.

**Tomografía eléctrica:** El objetivo de este método es obtener una sección 2D de resistividades reales del subsuelo, para ello será preciso el empleo de un programa de inversión para la transformación de resistividad aparente a valores de resistividad real (Geonica, 2017).

**Wenner-schlumberger:** En este tipo de arreglo (Figura 11) los electrodos M y N son situados de manera simétrica al centro y los electrodos de corriente A y B a una distancia mayor que la de M y N). En este arreglo las mediciones del primer nivel se hacen como el arreglo Wenner, y los siguientes niveles se hacen como si fuera un arreglo Schlumberger (Pérez, 2019).

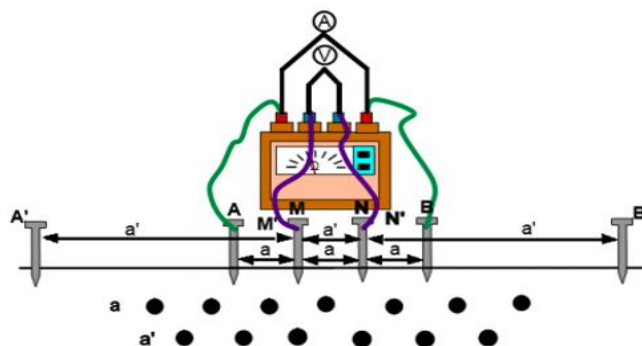


Figura 11. Arreglo Wenner-Schlumberger. Tomado de (Pérez, 2019).

**Inversión Geofísica:** En términos generales, la teoría de inversión permite determinar un modelo geológico a partir de la toma de datos observados o tomados en campo, estando este compuesto por parámetros geofísicos.

**Recursos inferidos:** Un Recurso Mineral Inferido es aquella parte de un Recurso Mineral para el cual, la cantidad y el tenor o calidad son estimadas sobre muestreos y evidencias geológicas limitadas. La evidencia geológica es suficiente para asumir, pero no para verificar la continuidad geológica, el tenor o la calidad (CRRC, 2018).

Un Recurso Mineral Inferido tiene un menor nivel de confianza del que se aplica a un Recurso Mineral Indicado, y no debe ser convertido a una Reserva Mineral. Es razonable esperar que la mayor parte de los Recursos Minerales Inferidos puedan convertirse a Recursos Minerales Indicados con la continuación de la exploración (CRRC, 2018).

## **6. MARCO GEOLÓGICO**

### **6.1 Geología Regional**

El área de estudio está localizada en la Cordillera Central de Colombia, en la región del suroccidente Antioqueño, en la denominada sub-cuenca de Amagá (Mejía, 1984).

Las unidades litoestratigráficas que afloran regionalmente en el municipio objeto de este estudio son:

#### **Grupo Ayurá Montebello (Pbsd, Pev, Pes):**

Conformado por rocas de bajo grado de metamorfismo que conservan la textura de la roca original y esquistos verdes de grado bajo a medio de metamorfismo regional. Este grupo está expuesto como cuerpos alargados con direcciones que concuerdan con la tendencia regional de las fallas, limitado al oeste por las rocas pertenecientes a la formación Barroso y cuerpos diseminados del terciario sedimentario y al este por la diorita de Pueblito.

El cuerpo principal de rocas metamórficas que atraviesa el municipio en toda su extensión, se encuentra próximo a la margen derecha del río Cauca y está limitado por las fallas Cauca y Quirimará. Se observan buenos afloramientos en la vía hacia Ebéjico, con foliación de dirección noreste y buzamientos fuertes al occidente. Igualmente, aflora en la quebrada Guaduala y Miraflores, en la carretera a Nariño y a la vereda Santander. Los afloramientos con dirección norte-sur muestran esquistos fuertemente meteorizados y alterados (Salamanca, 2000).

#### **Gabros de Romeral (Jgr):**

Corresponden a gabros con estructura de grano fino a pegmatíticos que se presentan localmente foliados. Estas rocas ígneas Intrusivas se asocian al sistema de fallas Romeral y se presentan como pequeños cuerpos emplazados entre las fallas Quirimará y Ebéjico, localizados en la zona centro- sur del municipio (Mejía, 1984)

Por otra parte, Mejía (1984) lo describe como rocas macizas con textura de flujo primaria, constituidas por plagioclasas, diópsido, hornblenda y actinolita; presenta minerales accesorios como apatito, ilmenita, feldespatos, alcalinos y epidota.

#### **Diorita de Pueblito (Jdp):**

Roca intrusiva de composición anfibolita que varía desde gabro hasta granodiorita cerca de los contactos, se presenta en la zona central del municipio de Ebéjico, con tendencia sur-norte, asociada al sistema de fallas regional. Esta unidad regional se encuentra limitada al oeste por la falla Quirimará que la pone en contacto fallado con las rocas metamórficas del grupo Ayurá-Montebello, y al oriente limita con las rocas del terciario sedimentario y la falla Ebéjico. Tiene afloramientos en la vía que conduce a Medellín, y en la vereda Santander se presenta fresco y fuertemente diaclasadas en contacto fallado con los esquistos (Mejía, 1984).

Esta unidad la conforma en más del 90% una diorita hornbléndica con variaciones a gabro y pequeñas manifestaciones cuarzosas y corresponden a la “diorita

anfíbólica” de Grosse (1926). La diorita es una roca de textura hipidiomórfica granular, ocasionalmente ofítica; está compuesta por plagioclasas fuertemente sausuritiza, augita y hornblenda; tanto la biotita como el cuarzo son accesorios ocasionales.

Los gabros de Romeral y la diorita de Pueblito, se encuentran dentro del llamado Complejo Ofiolítico del Cauca definidos por (Restrepo y Toussaint, 1976), lo que explicaría un origen co-magmático. Estos mismos autores dataron por K/Ar la diorita de Pueblito en  $163 \pm 10$  m.a.

### **Rocas Ultramáficas de Romeral (Jus):**

Restrepo y Toussaint (1976) describieron como complejo ofiolítico del Cauca una secuencia de rocas básicas y ultrabásicas ubicadas dentro del marco tectónico de Romeral. Se le asocian una edad  $163 \pm 10$  Ma.

### **Formación Quebrada Grande, Miembro Volcánico (Kivq):**

Nombre dado por Botero (1963) a un grupo de rocas volcánicas con intercalaciones de grauvacas, limolitas y chert. Esta formación la conforma espilitas, diabasas, basaltos, rocas piroclásticas, aglomerados y delgadas intercalaciones de grauvacas finas, limolitas ocasionalmente fosilíferas y chert. Este cuerpo que representa cerca del 30% de la litología del municipio se presenta como alargado con dirección norte-sur concordante con el sistema regional de fallas. Se localiza hacia la zona oriental, marcando el límite municipal y atraviesa el municipio en toda su extensión, aflora en la quebrada Valerie y en la carretera Palmitas–Ebéjico y río Amagá. Se encuentra limitado por las fallas San Jerónimo y Piedecuesta, y es atravesado por la falla Romeral, con algunos lentes diseminados de las dioritas de Heliconia (Mejía, 1984).

Las manifestaciones fosilíferas hasta hoy descritas de la Formación Quebradagrande por Grosse (1926) y Botero, et al. (1974) presentan una edad Cretáceo inferior (Hauteriviano – Albiano). Esta formación corresponde a la fase volcánica del “Complejo Ofiolítico del Cauca” (Restrepo Y Toussaint, 1976).

### **Grupo Cañas gordas, Formación Barroso (ksvbc).**

Este cuerpo de edad cretáceo conocido como las rocas volcánicas básicas de la cordillera occidental, ubicadas al oeste de la Falla Cauca, bordeando la margen derecha el río Cauca, coincidente con el cauce del río y limitadas al oeste por la formación Penderisco (Álvarez Y Gonzales, 1978), al este por la falla Cauca Media, la cual pone en contacto las rocas cretáceas con los esquistos del grupo Ayurá-Montebello.

A este grupo pertenecen rocas ígneas extrusivas como diabasas, basaltos, piroclastos y algunas almohadillas de lava con intercalaciones de lutitas, lodolitas y grauvacas. En esta zona fuertemente influenciada por las fallas Cauca Medio y Oeste, la roca (Ksvbc) se presenta como facies cataclasitas. Cuando están afectadas por las fallas del sistema Cauca-Romeral pueden desarrollar estructura de foliación que las confunden con los esquistos del Paleozoico. Estas rocas con perfiles de meteorización de espesor variable, y que forman suelos residuales de color rojizo, presentan contactos discordantes con las unidades cercanas y algunos de ellos se encuentran fallados, se encuentran limitadas por la falla Romeral (Mejía, 1984).

Las características descritas ubican estas rocas como derrames de fondos marinos en un "Arco insular". Los fósiles encontrados en sedimentos intercalados han dado edades Albiano (Feininger y Castro, 1965).

### **Diorita de Heliconia (Kdha):**

La composición normal es la de una diorita cuarzosa de grano medio, se caracteriza por presentar variaciones texturales y composicionales, presentando tres facies: normal, acida y básica. Se reporta una edad K/Ar en anfíbol de  $82 \pm 22$  Ma, lo que refleja un probable evento termal posterior al emplazamiento del cuerpo (Mejía, 1984).

## **Formación Amagá**

Estas rocas sedimentarias afloran en el municipio dos de sus tres miembros: el medio e inferior. Se presentan como secuencias sedimentarias conformadas por bancos interestratificados de areniscas, arcillas pizarrosas, conglomerados y bancos de hasta dos metros de espesor de carbón, principalmente en el miembro medio.

Estas rocas se presentan como bloques delgados de dirección norte-sur limitados generalmente por fallas con esta tendencia regional. El otro cuerpo, el principal, se encuentra hacia la zona central limitando con la falla Ebéjico y las rocas metamórficas del grupo Ayurá-Montebello al Oriente y al occidente está en contacto con la diorita de Pueblito (Van der Hammen, 1958), seguidamente se describen los diferentes cuerpos pertenecientes a la formación Amagá:

### **Formación Amagá Miembro Inferior (Toi):**

Se compone principalmente de conglomerados polimícticos, areniscas conglomeráticas y arcillolitas arenosas intercaladas con bancos de arenas, en menor proporción bancos delgados de carbón.

Se considera una edad del Cenozoico inferior, con base en estudios palinológicos se le asigna una edad del Oligoceno superior –Mioceno Inferior Grosse (1926); González (1980); Van der Hammen (1958); Mejía (1984).

### **Formación Amagá Miembro Medio (Tom):**

Se caracteriza principalmente por ser el miembro con contenido explotable de carbón, compuesto además por areniscas, lodolitas y, en menor proporción, pizarras, arcillolitas carbonosas, todo esto indican una sedimentación lacustre poco profunda con cambios bruscos en el ambiente regional (Mejía, 1984).

### **Formación Amagá - Miembro Superior (Tos):**

Grosse (1926) lo caracteriza principalmente por la ausencia de mantos explotables

de carbón y conglomerados. Presenta predominio de areniscas y lodolitas. Presenta un espesor mayor a 1000 m (Mejía, 1984).

### **Formación Combia (Tsc):**

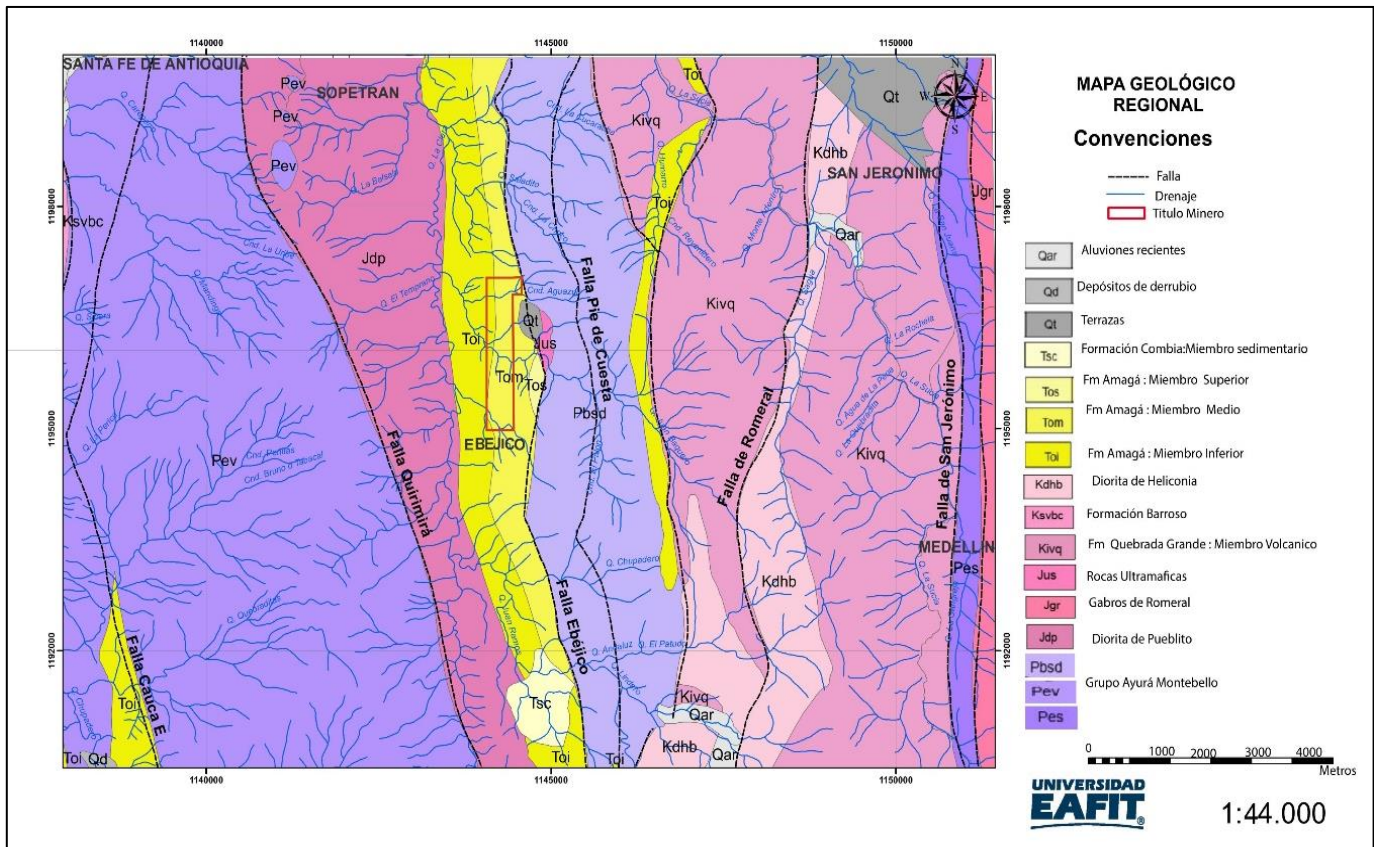
El Miembro sedimentario de la Formación Combia, se encuentra conformado por conglomerados polimícticos mal cementados y areniscas tobaceas. Este cuerpo se encuentra limitado al norte y sur por el Miembro Inferior de la formación Amagá, hacia el oriente se presentan rocas metamórficas del grupo Ayurá-Montebello y al Occidente se presenta la Diorita de Pueblito. Solo se tiene evidencia de un afloramiento en la quebrada Juan Ramos, la cual muestra grandes bloques de hasta 8 metros de diámetro de aglomerados volcánicos (Mejía, 1984)

Esta formación se le asocia una edad Mioceno tardío con base en dataciones de derrames basálticos de la misma formación (Restrepo et al., 1981).

### **Depósitos No Consolidados del Cuaternario (Qt, Qar, Qd):**

Los depósitos aluviales, Qar, conformados por arenas y gravas rellenan los cauces y conforman las planicies de inundación de los ríos principales. Ocurren en forma continua a lo largo del curso de quebradas importantes como Juan Ramos, La Clara, La Guaduala, Perico, entre otras, los cuales se confunden a veces con los abanicos formados cuando las corrientes tributan al Cauca.

Las terrazas aluviales (Qt) se presentan asociados a quebradas cuyos depósitos aluviales han sufrido levantamientos quedando colgados por efectos tectónicos, o se han formado por incisión de las corrientes de agua. Se encuentran constituidos por gruesos bancos de grava con intercalaciones, a veces bien estratificados de arena y limos, las superficies generadas son planas y generalmente horizontales o poco inclinadas (Mejía, 1984).



**Figura 12.** Mapa geológico y estructural regional. Fuente: Plancha 146 Medellín Occidental del SGC.

## 6.2 Geología Estructural

Esta región, que se localiza en el límite entre el dominio oceánico y el continental, tiene en la depresión del Río Cauca la influencia de un sistema regional de fallas importante, como es el denominado sistema Cauca-Romeral.

Este sistema se extiende a través de Colombia por más de 800 kilómetros de sur a norte. Está conformado por diferentes frentes de falla en la zona de estudio, donde se encuentran fallas de tendencia norte-sur y buzamientos empinados a verticales como las fallas Cauca Este, Medio y Oeste, Quirimará, Piedecuesta, Ebéjico, Romeral, San Jerónimo (figura 12).

A este sistema de fallas se pueden asociar la presencia de anomalías gravimétricas y magnetometrías, concentración de focos de actividad sísmica, lineamientos de

deslizamientos, cárcavas, control y bifurcación de quebradas, ocasionalmente, el contacto entre diferentes litologías producto del movimiento de bloques desplazados o el emplazamiento de plutones a través de las zonas de debilidad, con direcciones predominantes norte-sur (Mejía, 1984).

### **6.3 Geología Local**

La Formación Amagá es una sucesión siliciclástica depositada a lo largo de varias cuencas ultramontanas semi-aisladas ubicadas a lo largo de la parte más septentrional del cinturón orogénico de los Andes del norte, ubicada entre las Cordilleras Occidental y Central de Colombia (Silva et al., 2018).

Esta formación fue definida inicialmente por Grosse (1926) como Terciario Carbonífero de Antioquia, la cual subdividió en pisos con base al contenido de carbón explotable y no explotable. Fue elevada al grado de Formación por Van der Hammen (1958), siguiendo la nomenclatura expuesta inicialmente por Grosse y la renombró como Formación Antioquia.

Posteriormente, González (1980) la renombra Formación Amagá por la sección tipo descrita en las cercanías de la población de Amagá en el departamento de Antioquia y la subdivide en tres miembros superior, medio e inferior; finalmente, Sierra et al. (2001) subdivide la Formación Amagá en miembro Superior e Inferior, de acuerdo con las asociaciones de facies que se presentan y las características petrográficas.

Esta formación cubre en el departamento de Antioquia un área aproximada de 700 km<sup>2</sup> en una cuenca continua desde el municipio de Amagá hasta el sur de Valparaíso y Supía y cuencas menores cerca de San Jerónimo, Sopetrán y Santa Fé de Antioquia (Mejía, 1984).

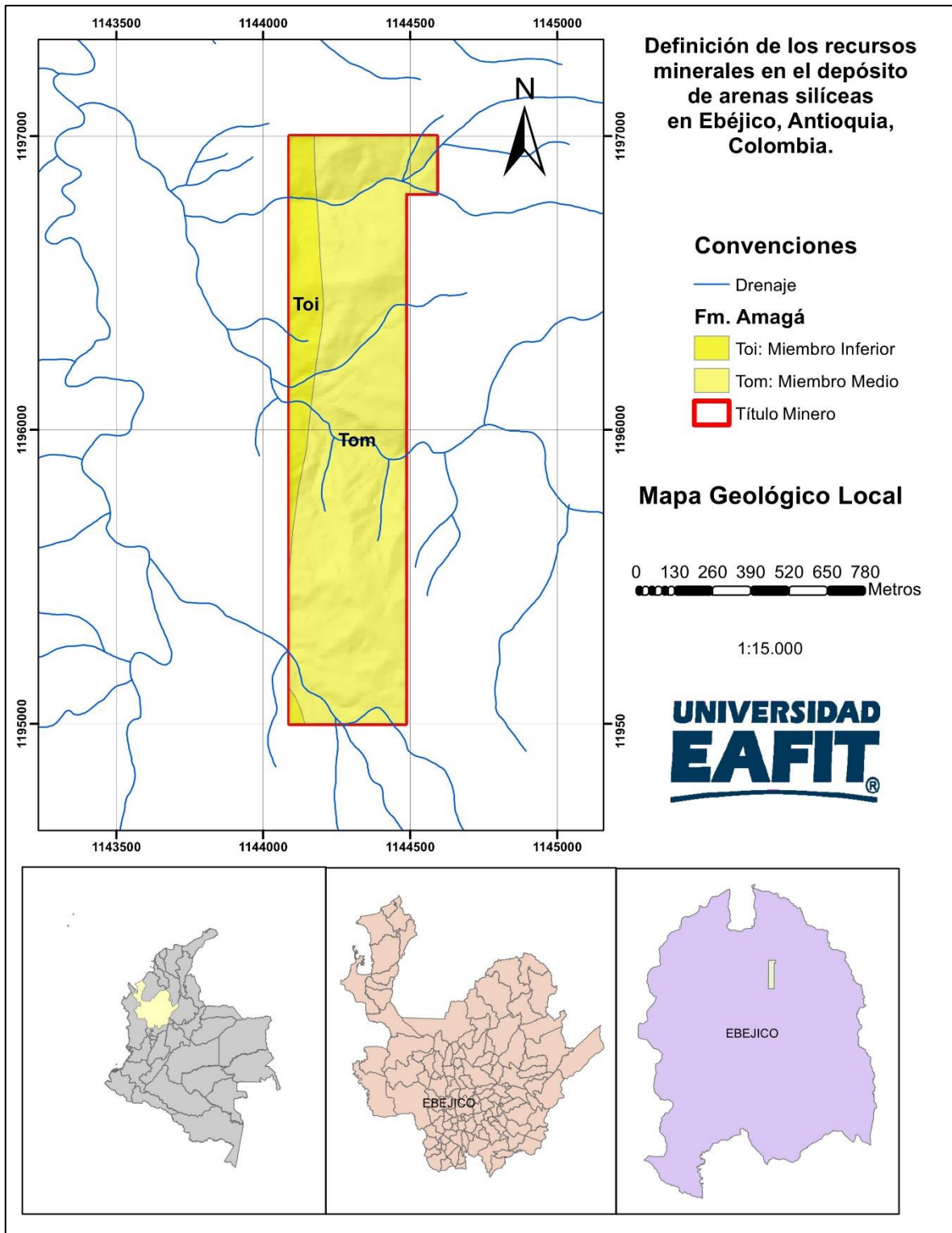
Esta unidad presenta una forma alargada con dirección S-N estrechándose hacia el Norte y es discontinua en toda su extensión. Conforme a su posición estratigráfica, esta se superpone inconformemente con el basamento metamórfico paleozoico de

la Cordillera Central de Colombia y es suprayacida discordantemente por sucesiones volcánicas cenozoicas tardías de la Formación Combia (Guzmán, 1991; Guzmán y Sierra, 1984; Hernández, 1998; Murillo, 1998).

En la zona de estudio aflora el miembro medio e inferior de la Formación Amagá (Figura 13), el cual presenta un espesor aproximadamente de 294 m, posee mantos explotables de carbón y está compuesto principalmente por areniscas, lodolitas y, en menor proporción, arcillolitas (Mejía, 1984), la depositación de este miembro se asocia a ambientes fluviales de ríos trenzados que luego, evolucionaron a una asociación de facies características de ambientes fluviales de ríos meándricos con asociaciones de litofacies de grano fino de sublitorenitas bien clasificadas con alto contenido de cuarzo (Silva et al., 2008 ; Sierra y Marín-Cerón, 2011).

Los estudios petrográficos en areniscas del Miembro Inferior de la Formación Amagá muestran areniscas de grano medio moderadamente clasificadas y bien clasificadas, que consisten en cuarzo policristalino y monocristalino, feldespato K, plagioclasa, fragmentos de rocas metamórficas y plutónicas, y minerales accesorios tales como mica, anfíboles, clorita, piroxeno, apatita, circón, granate y rutilo (Silva et al., 2008).

Por último, la edad de la formación Amagá es muy controversial debido a la inconsistencia entre los datos geo-cronológicos y palinológicos. Van der Hammen (1958) y Pons (1984), basados en los conjuntos palinológicos observados en depósitos de llanuras aluviales de la parte más baja del Miembro Inferior, estos sugirieron una edad media de oligoceno para su sedimentación inicial. Ramírez et al. (2015) con base en datos palinológicos que sugieren una edad Eoceno-Mioceno, mientras que los datos de U-Pb en circones indican una edad Oligoceno-Mioceno temprano para el miembro Inferior (Montes et al., 2015).



**Figura 13.** Mapa geológico local. Fuente: Plancha 146- Medellín Occidental del SGC.

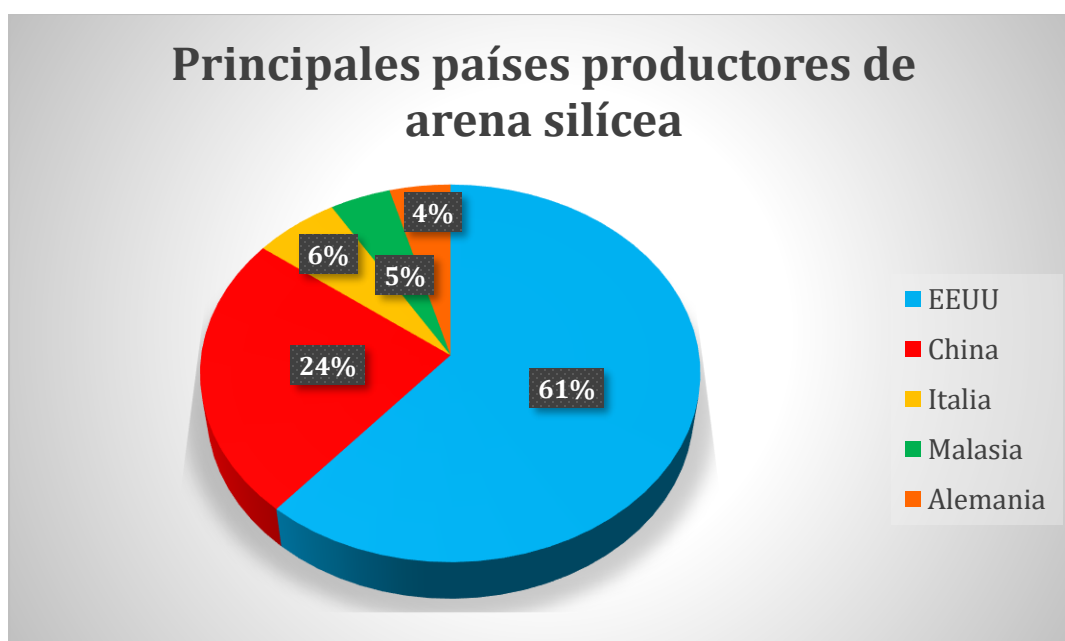
## 7.MERCADO DE LAS ARENAS SILÍCEAS

### 7.1 Producción y consumo

A continuación, se hará un breve recorrido por la producción y consumo global, nacional y en Antioquia

#### 7.1.1 Producción global

A nivel mundial se pueden apreciar cinco principales productores de arena silícea, entre ellos el principal productor es Estados Unidos con una participación aproximada de 61%, seguido de China con un 24%; El 15% restante de la producción mundial se distribuye entre países como Italia con 6%, Malasia con 5% y finalmente Alemania con 4% respectivamente (figura 14).



**Figura 14.** Principales países productores de arena silícea. Datos tomados (UPME, 2018).

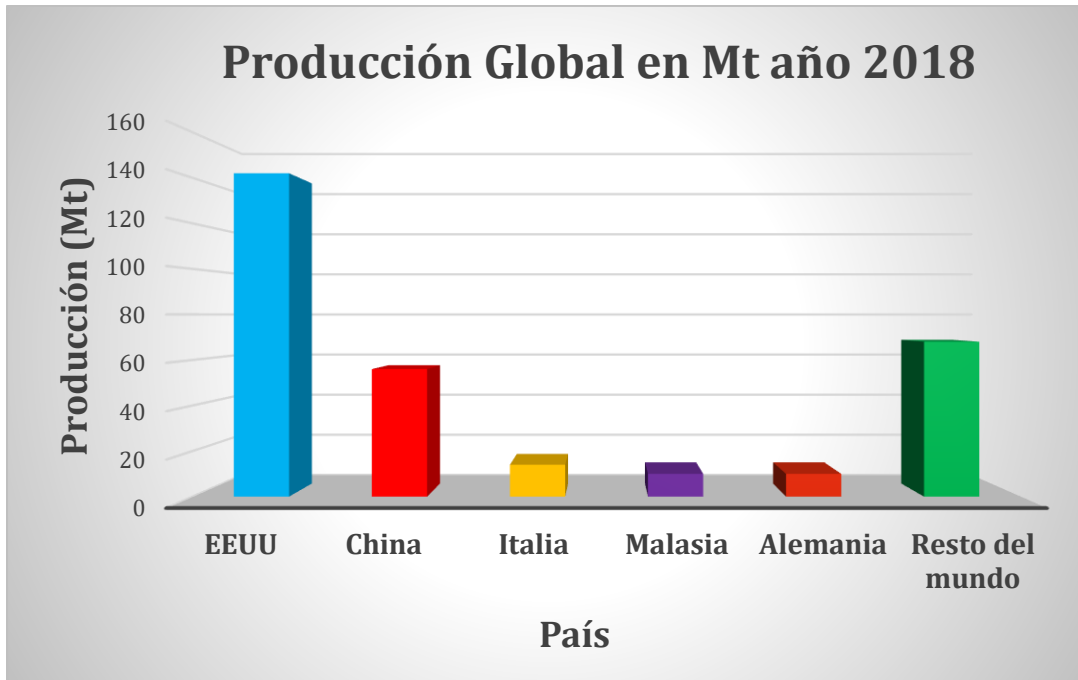
La oferta de arenas silíceas alcanzó su máximo histórico en 2017, siendo EEUU el principal productor por un amplio margen con un 60% de la producción (130 Mt), seguido de China con un 19% (54 Mt), Italia, Malasia y Alemania tomaron los puestos restantes como los principales 5 productores, pero solo contribuyeron con

un 12% (34 Mt) en conjunto. Otros 58 países contribuyeron el 24% restante (68 Mt) para la oferta global como se muestra en la (figura 15).

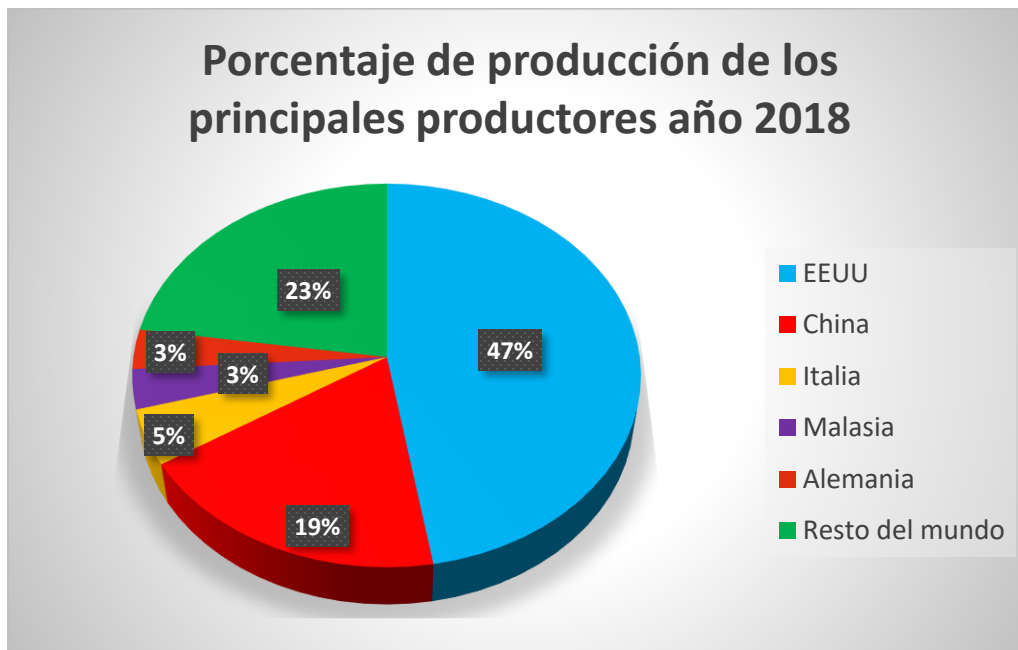


**Figura 15.** Producción histórica Arena silíceo 2008-2017. Datos tomados (UPME, 2018)

Para el año 2018 las cifras aumentaron a 300 Mt en total, Estados Unidos mostró su liderazgo bien marcado con 142 Mt representado aproximadamente el mayor volumen de producción de arenas global para ese año con un 47% (Figura 16), en segundo lugar, se encuentra China con una producción de 56 Mt teniendo una participación del 19%. Además de esto, países como Italia con una producción de 14 Mt, Malasia y Alemania con 10 Mt representan un 11% de la producción total; el resto del mundo con 68 Mt componen el 23% restante de la producción para el año en análisis, estos datos se evidencian en la figura 16 y figura 17.



**Figura 16.** Producción global en Mt año 2018. Datos Tomados (UPME, 2018).



**Figura 17.** Porcentaje de producción de los principales productores en el año 2018 Datos Tomados (UPME, 2018)

Según proyecciones de la Unidad de planeación Minero Energética, la producción total de arenas síliceas alcanzará 500 Mt en 2035, un alza de 150 Mt en comparación con el año 2020; EEUU será el principal contribuyente al ascenso en

la oferta, de 142 Mt en 2020 a 263 Mt para 2035. China es el segundo productor principal y aumentará su producción en 43 Mt, lo que representa un 19% de crecimiento total.

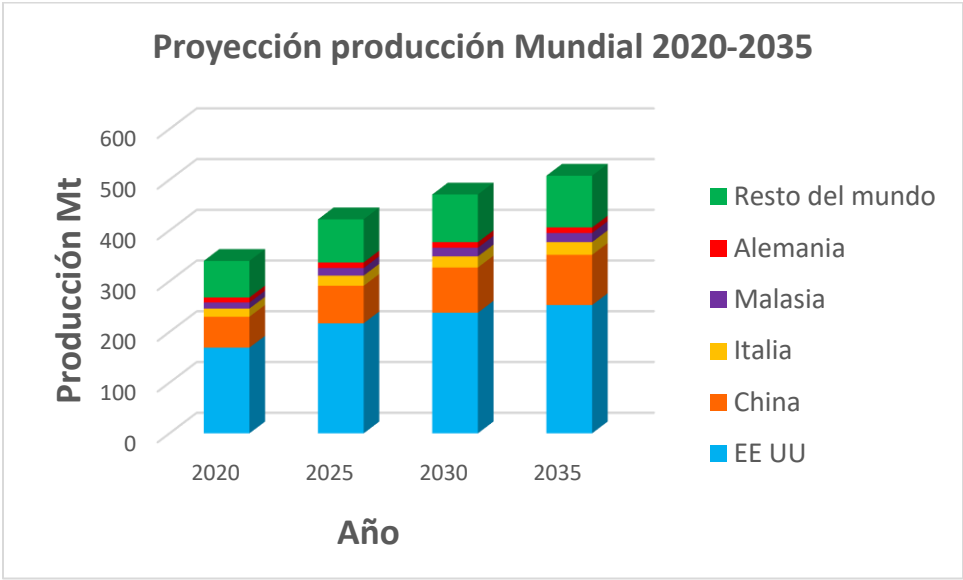
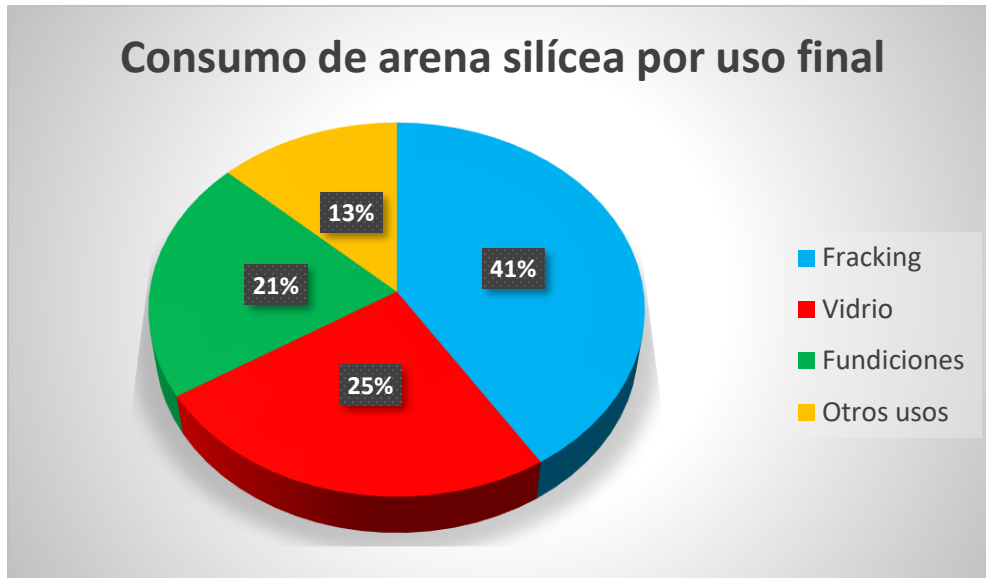


Figura 18. Proyección producción Mundial 2020-2035. Datos tomados (UPME,2018).

Los recursos de arenas silíceas son abundantes a nivel global, por lo que no hay límites de requerimientos de producción. Sin embargo, los usos se van especializando y las industrias exigen arenas especiales para diferentes procesos productivos, por lo tanto, su precio también va en ascenso.

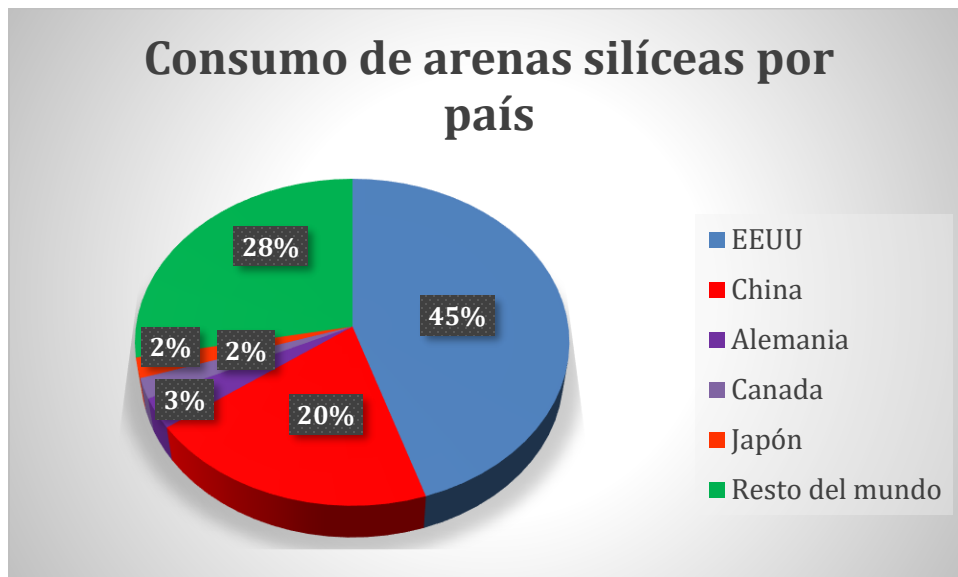
### 7.1.2 Consumo a nivel global

Las arenas silíceas se usan principalmente para la fracturación hidráulica (fracking), producción de gas, producción de vidrio y en aplicaciones de fundiciones (Figura 19). El fracking representa un 41% de la demanda total, seguido del vidrio con un 25%, sector de fundiciones con un 21% y por último, otros usos representan un 13% siendo empleadas en la industria química y como material de relleno en la construcción, entre otros.



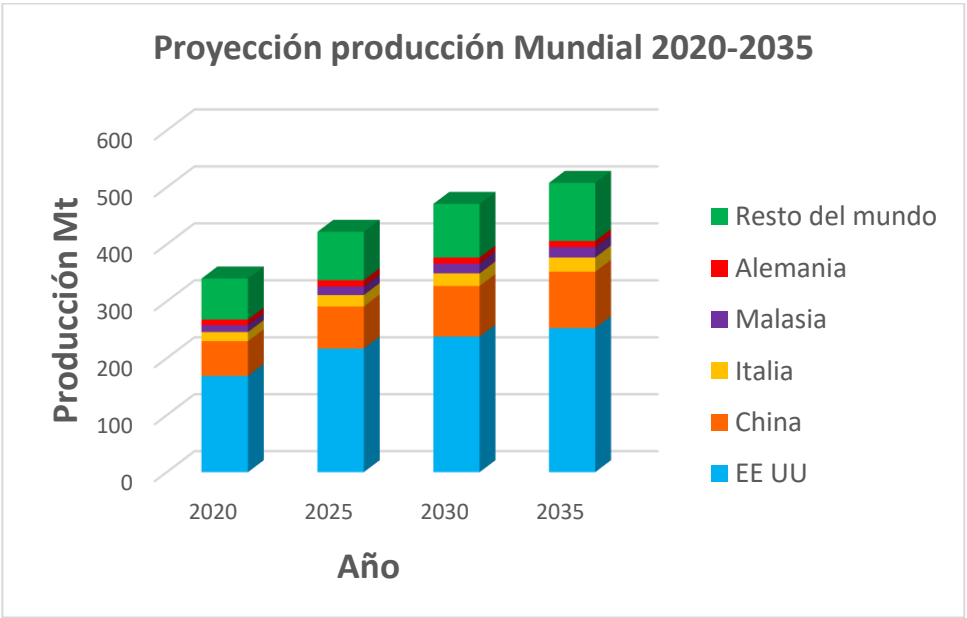
**Figura 19.** Porcentajes del consumo de arena sílicea por uso a nivel mundial. Datos tomados (UPME, 2018).

EE.UU. es la región con mayor demanda de arenas síliceas, esto se debe a su dominio en el mercado global industrial y al rápido crecimiento del sector de fracking, representando un 45% como principal consumidor, seguido de China con un 20%, Alemania con un 3%, Canadá y Japón con 2% respectivamente. El resto del mundo representa el 28% del consumo total (Figura 20).



**Figura 20.** Consumo de arenas síliceas por país. Datos tomados de (UPME, 2018).

Según proyecciones, el consumo total de arenas silíceas alcanzará los 527 Mt en 2035, EE. UU. se mantendrá como el principal productor, la demanda aumentará de 139 Mt en 2018 a 254 Mt para 2035. EE. UU. y China representarán la mayoría del crecimiento en la demanda, con consumos en aumento a 3,6% y 3,4% de la Tasa de Crecimiento Anual Compuesto (UPME, 2018), respectivamente, con un total de 158 Mt de crecimiento para 2035. El fracking en el sector del petróleo y gas será el principal impulsor en la demanda a largo plazo y mantendrá alrededor de un 50% de la demanda total de arenas silíceas. La demanda global de arenas de fracturación aumentará, de 127 Mt en 2018 a 258 Mt en 2035. Se espera que USA represente un 73% de este crecimiento a medida que explotan sus extensos recursos de roca de esquisto, que ha generado una revolución en el sector energético doméstico (Figura 21).



**Figura 21.** Proyección Consumo Mundial 2020-2035. Datos tomados (UPME, 2018).

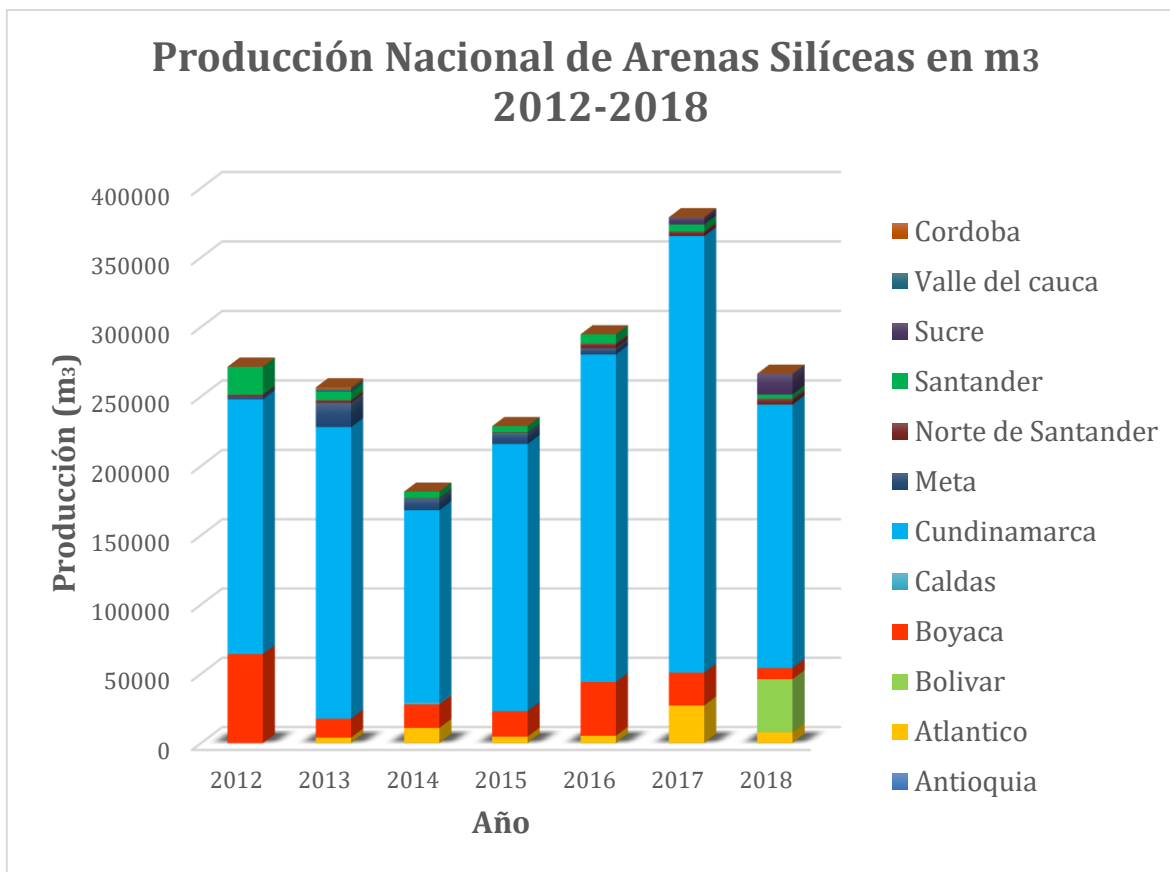
### 7.1.3 Producción a nivel nacional

En Colombia el máximo productor de arenas silíceas es Cundinamarca con un 78% de la producción, en segundo lugar, Boyacá con un 10 %; luego en tercer lugar se encuentra Atlántico y Santander con un 3%; en cuarto lugar, Meta y Bolívar con un 2%; seguido de los departamentos de Sucre y Norte de Santander con un 1%; y por último el Valle del Cauca (Figura 22).



**Figura 22.** Principales productores a nivel nacional 2012-2018. Datos tomados de (UPME, 2018).  
<http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/arenassiliceas.aspx>

Según el recuento de producción desde el 2012 hasta el 2018 se puede observar la predominancia del departamento de Cundinamarca, seguido de Boyacá. Los departamentos de Bolívar, Atlántico y Sucre han venido en aumento desde el 2017, siendo en el 2018 uno de los que más produce, entre tanto, Meta descendió en su producción (figura 23).



**Figura 23.** Producción Nacional de Arenas Silíceas en m<sup>3</sup> 2012-2018. Datos tomados de <http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/arenassiliceas.aspx>.

#### 7.1.4 Consumo nacional

Básicamente, en Colombia el consumo de Arenas y Gravas silíceas se implementan en la fabricación de vidrio, filtros para acueductos y en menor proporción para metalurgia, pegantes, cerámica y Sand-Blasting.

Teniendo en cuenta la información suministrada por las diferentes empresas contactadas de manera informal, se pueden establecer 3 tipos de clientes potenciales:

*Clientes Tipo A:* Pedidos mayores a 10.000 m<sup>3</sup> mensuales, como Peldar y otras empresas de la industria del vidrio.

*Clientes Tipo B:* Pedidos menores a 10.000 m<sup>3</sup> mensuales, como empresas y contratistas de manejo de acueductos para la fabricación de filtros de agua.

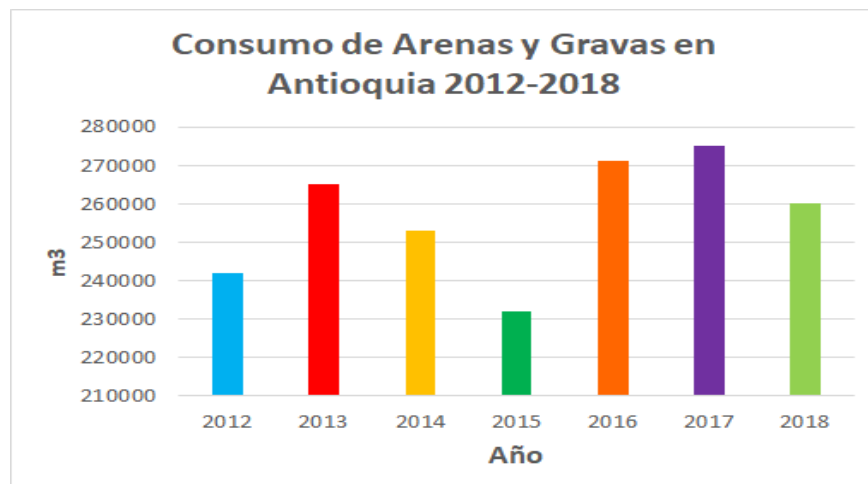
*Clientes Tipo C:* Pedidos menores a 100 m<sup>3</sup> mensuales, como materia prima en la industria de la metalurgia y empresas relacionadas con la utilización de Sand-Blasting.

La mayor concentración de demanda de arenas silíceas se ubica en las ciudades más pobladas del país entre ellas se destacan Bogotá, Medellín, Cali, Bucaramanga, Barranquilla, Ibagué (Cubides, 2014).

### 7.1.5 Mercado regional

Teniendo en cuenta la gráfica de los principales productores en el país (Figura 22), Antioquía no se encuentra entre estos, ya que su producción es muy baja con aproximadamente 55 m<sup>3</sup> al año, según los datos reportados por el Dane a la Upme, lo cual no es una cifra representativa en la producción nacional. Por otro lado, Antioquia es una de las de mayor demanda, siendo su consumidor principal Sumicol.

Haciendo un recorrido en el consumo de Antioquía desde el año 2012 hasta el año 2018 (Figura 24), se puede observar como ha venido aumentando el consumo. Durante el año 2012 el departamento tuvo un consumo de aproximadamente 243.000 m<sup>3</sup>, mientras que en el 2017 y 2018 el consumo fue de 275.000 m<sup>3</sup> y 260.000 m<sup>3</sup> respectivamente.



**Figura 24.** Consumo de arenas y gravas en el departamento de Antioquia 2012-2018. Datos tomados de <http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/arenassiliceas.aspx>

## **7.2 Usos de las arenas silíceas**

Las arenas silíceas se caracterizan por presentar altos porcentajes de  $\text{SiO}_2$ , en la mayoría de sus usos requieren porcentajes de sílice superiores a un 95% (Upme, 2018). Estas arenas constituyen una materia prima fundamental en diferentes campos de la industria tales como: vidrio plano, vidrio hueco, pegantes, pinturas, cerámicas, concretos, fracturación hidráulica, entre otros.

### **7.2.1 Arenas para vidrio**

La gran mayoría de la producción de arenas silíceas se implementa en la elaboración de vidrio comercial debido a su alto contenido de sílice, en el cual su pureza química determina las características tales como el color, claridad y resistencia. La mayoría de la cristalería empleada diariamente como botellas, jarras y ventanas corresponden a vidrio de sílice. Hay que resaltar que se necesitan aproximadamente 0,6 ton de arenas silíceas por tonelada de vidrio (Upme, 2018).

Por otra parte, la fabricación de vidrio requiere de arenas cuarzosas con características físicas y químicas muy uniformes, ya que, variaciones composicionales pueden provocar efectos de fabricación evidentes; para clasificar una arena como de alta calidad debe presentar valores de  $\text{SiO}_2$  cercanos al 99% (Secretaría de Economía, 2013)

Es importante resaltar que el principal problema para los fabricantes de vidrio se asocia al contenido de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) debido a que, este compuesto puede provocar coloración en el vidrio o cristal, en la tabla 4 se definen los valores composicionales para los diferentes tipos de vidrio.

**Tabla 4.** Composición modal de las arenas silíceas para los diferentes tipos de vidrio, tomado de (Secretaría de Economía, 2013).

<b>Tipo de Vidrio Calidad</b>	<b>SiO2 %Mín</b>	<b>Al2O3 %Máx</b>	<b>Fe2O3 %Máx</b>	<b>CaO+MgO %Máx</b>
Óptica	99.8	0.1	0.22	0.10
Cristal de mesa	98.5	0.5	0.035	0.20
Cristal de Flint	95.0	4.0	0.06	0.50
Vidrio cilindrado, varilla y vidrio pulido	98.5	0.5	0.06	0.50
Vidrio para placas roladas y pulidas	95.0	4.0	0.6	0.50
Vidrio natural, vidrio para ventana	98.5	0.5	0.30	0.50
Vidrio natural	95.0	4.0	0.30	0.50
Vidrio Verde	98.5	0.5	1.0	0.50
Vidrio Ámbar	95.0	4.0	1.0	0.50

Las muestras no deben presentar minerales densos de alta refractariedad tales como andalucita, sillimanita, circón, ya que en tamaños superiores a 250 micras los hacen prácticamente infundibles en hornos industriales (Rojo, 2008).

Además, existen otros requisitos físicos como el tamaño de grano que son importantes para determinar el empleo en la industria del vidrio, en la tabla 5 se definen los límites del tamaño de grano planteados para la fabricación de vidrio.

**Tabla 5.** Tamaños límites de grano para la fabricación de vidrio. Tomado de (Secretaría de Economía, 2013).

<b>Malla Tyler N°</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Retención en la malla señalada</b>
20	0.833	0%
42	0.351	20% Máximo
100	0.147	90 % Mínimo
200	0.74	100%

### **7.2.2 Arenas para fundentes**

Las arenas silíceas para fundición deben ser arenas refractarias, limpias a las que se le añada pequeñas cantidades de arcilla (Bustamante, 2009). Estas se usan como el principal material de moldaje para mezclas ferrosas y no ferrosas, este material, debido a que es químicamente inerte y gracias a su alto contenido de SiO<sub>2</sub>, tiene alta resistencia térmica producto de su alto punto de fundición (Upme, 2018), en la tabla 6 se definen los diferentes parámetros necesarios para la fundición.

Por otra parte, los tamaños de grano utilizados son principalmente gravas con diámetros de 2 a 4 mm (Secretaría de Economía, 2013); la forma de grano más conveniente para la industria es de tipo sub-angular o redondo ya que permiten que las resinas y catalizadores que se utilizan al realizar moldes penetren libremente los espacios intersticiales (Upme, 2018).

**Tabla 6.** Características físicas, granulométricas y químicas para las arenas empleadas en la industria de la fundición, tomado de (Indusilika S.A.S, 2017).

<b>Empleo/ Moldes en fundición</b>		
<b>Distribución Granulométrica</b>	Malla +16	52%
	Malla +20	38%
	Malla -20	10%
<b>Propiedades Físicas</b>	Densidad de Partícula, g/cm <sup>3</sup>	2.6 g/cm <sup>3</sup>
	Densidad Aparente, g/cm <sup>3</sup>	1.4 g/cm <sup>3</sup>
	% Humedad	1%
	Valor del Ph	7
<b>Composición Química</b>	% SiO <sub>2</sub>	95% min
	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,60% máx.
	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12% máx.
	% TiO <sub>2</sub>	0,05 máx.
	% PPC	1,23 máx.

Por otra parte, los tamaños de grano utilizados son principalmente gravas con diámetros de 2 a 4 mm (Secretaria de Economía, 2013); la forma de grano más conveniente para la industria es de tipo sub-angular o redondo ya que permiten que las resinas y catalizadores que se utilizan al realizar moldes penetren libremente los espacios intersticiales (Upme, 2018).

### **7.2.3 Arenas para pintura**

Las arenas silíceas cumplen un papel importante en la producción de pinturas, características como la pureza y el tamaño de grano mejoran la apariencia e influyen directamente en parámetros tales como: brillo, reflectancia, color, consistencia, resistencia a la suciedad, agrietamiento, entre otras. La durabilidad de las pinturas

está fuertemente unida con la composición del sílice ya que este transmite excelente resistencia a la abrasión y corrosión (Servicio Geológico Británico, 2009). En la tabla 7 se presentan las características fundamentales de las arenas para ser empleadas como materia prima en la producción de pinturas.

**Tabla 7.** Características físicas, granulométricas y químicas para las arenas empleadas en la industria de la pintura. Tomado de (Indusilika S.A.S, 2017)

<b>Empleo - Abrasivos/Pintura</b>		
<b>Distribución Granulométrica</b>	Malla +30	2% Max
	Malla +60	77-86% Max
	Malla +140	15-21%Max
	Malla -140	2% Max
<b>Propiedades Físicas</b>	Densidad de Partícula, g/cm <sup>3</sup>	2.6 g/cm <sup>3</sup>
	Densidad Aparente, g/cm <sup>3</sup>	1.4 g/cm <sup>3</sup>
	% Humedad	1%
	Valor del Ph	7
<b>Composición Química</b>	% SiO <sub>2</sub>	95% min
	% Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,60% Max
	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12% Max
	% TiO <sub>2</sub>	0,05 Max
	% PPC	1,23 Max

#### 7.2.4 Arenas para concreto

La industria de las arenas silíceas para la construcción más específicamente como árido en hormigones y agregados bituminosos presenta exigencias fundamentales (Tabla 8) en realizar un lavado aceptable del mineral, el cual permita una reducción

en el contenido de arcilla y materiales finales (Rojo, 2008). Además de esto, propiedades como la forma, tamaño de las partículas influyen directamente en la calidad del hormigón fresco y endurecido (Donza, 2002).

**Tabla 8.** Características físicas, granulométricas y químicas para las arenas empleadas en la industria de la construcción (Hormigones), tomado de (Indusilika S.A.S, 2017).

<b>Empleo - Construcción</b>		
<b>Distribución Granulométrica</b>	Malla +20	1%
	Malla +40	89%
	Malla -40	10%
<b>Propiedades Físicas</b>	Densidad de Partícula, g/cm <sup>3</sup>	2.6 g/cm <sup>3</sup>
	Densidad Aparente, g/cm <sup>3</sup>	1.4 g/cm <sup>3</sup>
	% Humedad	1%
	Valor del Ph	7
<b>Composición Química</b>	% SiO <sub>2</sub>	95% min
	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,60% Max
	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12% Max
	% TiO <sub>2</sub>	0,05 Max
	% PPC	1,23 Max

Cabe destacar, que las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto realizado con agregados de arena dependen fundamentalmente de las características físicas siendo la forma y la textura factores muy importantes ya que de estos depende la cantidad de agua empleada para producir el concreto (Donza, 2002). Es importante resaltar que el sílice no altera las propiedades químicas del sistema y cumple funciones anticorrosivas debido a su alta resistencia a la meteorización (Mansour, 2015).

### 7.2.5 Arenas para fracturación hidráulica

El sector del petróleo y gas es el más importante como uso final a largo plazo ya que este es el principal impulsor de la economía de los diferentes países. Las arenas silíceas para este sector se denominan areniscas de fracturación y se emplean como agente de soporte en la exploración y producción de petróleo (Upme, 2018).

El proceso de fracturación hidráulica provoca que las secciones alrededor del pozo se fracturen y que los recursos tales como el petróleo y el gas sean liberados, por lo tanto, las arenas de fracturación cumplen la función de permitir que las fisuras permanezcan abiertas debido a la presión de sobrecarga que existen en los pozos (Upme, 2018). Este tipo de arenas presentan rigurosas especificaciones físicas ya que se implementan para maximizar la producción en depósitos “apretados” y no convencionales (Beckwith, 2011).

La arena para fracturación hidráulica incluye contenidos de sílice de alta calidad con una variedad de tamaños y formas de partículas, incluyen principalmente granos esféricos redondeados con alto aplastamiento, resistencia y bajo contenido de finos (Mansour, 2015). En la tabla 9, se definen las propiedades de las arenas para el uso en fracking.

**Tabla 9.** Características físicas, granulométricas y químicas para las arenas empleadas en la industria de fracturación hidráulica, tomado de (Benson y Wilson, 2015).

<b>Empleo/ Fracturación Hidráulica</b>		
<b>Distribución Granulométrica</b>	Malla 40	1%
	Malla 45	13.7%
	Malla 50	32.3%
	Malla 60	26.3%
	Malla 70	23.4%
	Malla 100	3%
<b>Propiedades Físicas</b>	Densidad de Partícula, g/cm <sup>3</sup>	2.6 g/cm <sup>3</sup>
	Redondez	≥ 0.6
	Esfericidad	≥ 0.6
<b>Composición Química</b>	% SiO <sub>2</sub>	95% min

Es de resaltar que las areniscas con contenidos de  $\text{SiO}_2 > 90\%$  son de mayor calidad para la industria de fracturación hidráulica (Zdunczyk, 2007, 2014), aunque la gran mayoría de las arenas utilizadas presentan valores composicionales de sílice que varían entre 95%-99% (Benson y Wilson, 2015).

#### **7.2.6 Arenas para Sandblasting.**

El proceso de Sandblasting consiste en la limpieza superficial de materiales proyectando granos abrasivos por soplo de aire comprimido con una presión adecuada, el impacto del medio abrasivo se realiza a través de algún mecanismo o sistema, que lanza el abrasivo en este caso las arenas a granel para que impacte la superficie que se quiere procesar. El efecto de este choque provoca que las partículas no adheridas sean desplazadas (polvo, óxido de corrosión, pintura, entre otras), obteniendo como resultado una limpieza profunda (Gómez y Lozada, 2008). Las arenas representan la materia prima fundamental para este proceso, siendo el abrasivo más utilizado debido a su abundancia y costo.

Las características requeridas por la industria son principalmente:

- Granulometría entre 2 mm grano grueso y 0,06 mm grano delgado.
- Tamaño de grano de irregular a redondeado.
- Arenas entre malla 30 y 60 que permitan un buen anclaje.

## 7.3 Mercado local

### 7.3.1 Empresas que consumen arenas silíceas en Antioquia.

Entre las empresas que consumen arenas silíceas en el departamento de Antioquía se encuentra Pintuco, Sika, fundiciones Espitia, Andercol, Erecos, Bronco, Sumiglas S.A., Fymecol S.A, Pinturas Tito pavon, Imusa, Sumiglas y Sumicol (Anexo 4).

### 7.3.2 Precios de las arenas silíceas en el mercado local y regional

En las siguientes tablas se mencionan algunos precios de las arenas silíceas en el mercado regional y local, tanto su precio de venta como transporte. Cabe destacar que todos estos precios se cotizaron de una manera informal con dichas empresas (Anexo 4).

**Tabla 10.** Precios de arena silícea de la empresa ingeniera gravas y arenas C.I en Ricaurte Cundinamarca

Ingeniería Gravas y Arenas C.I.		S.A.S. RICAURTE CUNDINAMARCA		
Granulometría	Uso	Cantidad	Precio de Venta	Precio con Transporte puesto en Medellín
8/12 - 10/20 - 16/30	Filtro de Agua	1 tonelada	100.000	150.000
20/30 - 20/40	Sandblasting		100.000	150.000
30/40 - 40/50	Canchas		100.000	150.000
30/40 - 40/50 - 50/70	Fundición		100.000	150.000
40/140	Pegante		85.000	100.000
70/140	Pañete		85.000	100.000
70 -80 - 90/140	Micro Cemento		120.000	170.000
30/60	Silicatos		100.000	150.000
40/60 - 40/70	Vidrio		100.000	150.000
50/200	Fina		165.000	215.000
30/50	Media		100.000	150.000
20/30	Gruesa		100.000	150.000
200/300			50.000	285.000

**Tabla 11.** Precios de arena silíceas de la empresa Indusilika en Bello Antioquia.

<b>Indusilika SAS Bello Antioquia</b>			
<b>Granulometría</b>	<b>Uso</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio de Venta</b>
25/40	Sandblasting	1 tonelada	104.000
20/40	Parques Infantiles y canchas		65.200
200 -270 -325	Microcemento		60.000
6/8- 8/12-12/20 20/30 20/40	Filtros de Arena		55.200
30/140	Fundición		65.500
150	Placas Corona		62.000
40/80	Canchas Sintéticas		65.500
70 tapa	Relleno de materiales para construcción		63.000

## **8.RESULTADOS**

### **8.1 Columnas estratigráficas**

En el área de trabajo se levantaron tres columnas estratigráficas teniendo en cuenta, principalmente, las características composicionales, tamaño de grano, análisis petrográfico, espesor y datos estructurales.

#### **8.1.1 Sección estratigráfica Vía Horna**

En la parte Sur del área de estudio, se levantaron 81.55 metros de espesor de capas compuestas por areniscas, arcillolitas y mantos de carbón (figura 25); de base a techo está compuesta por:

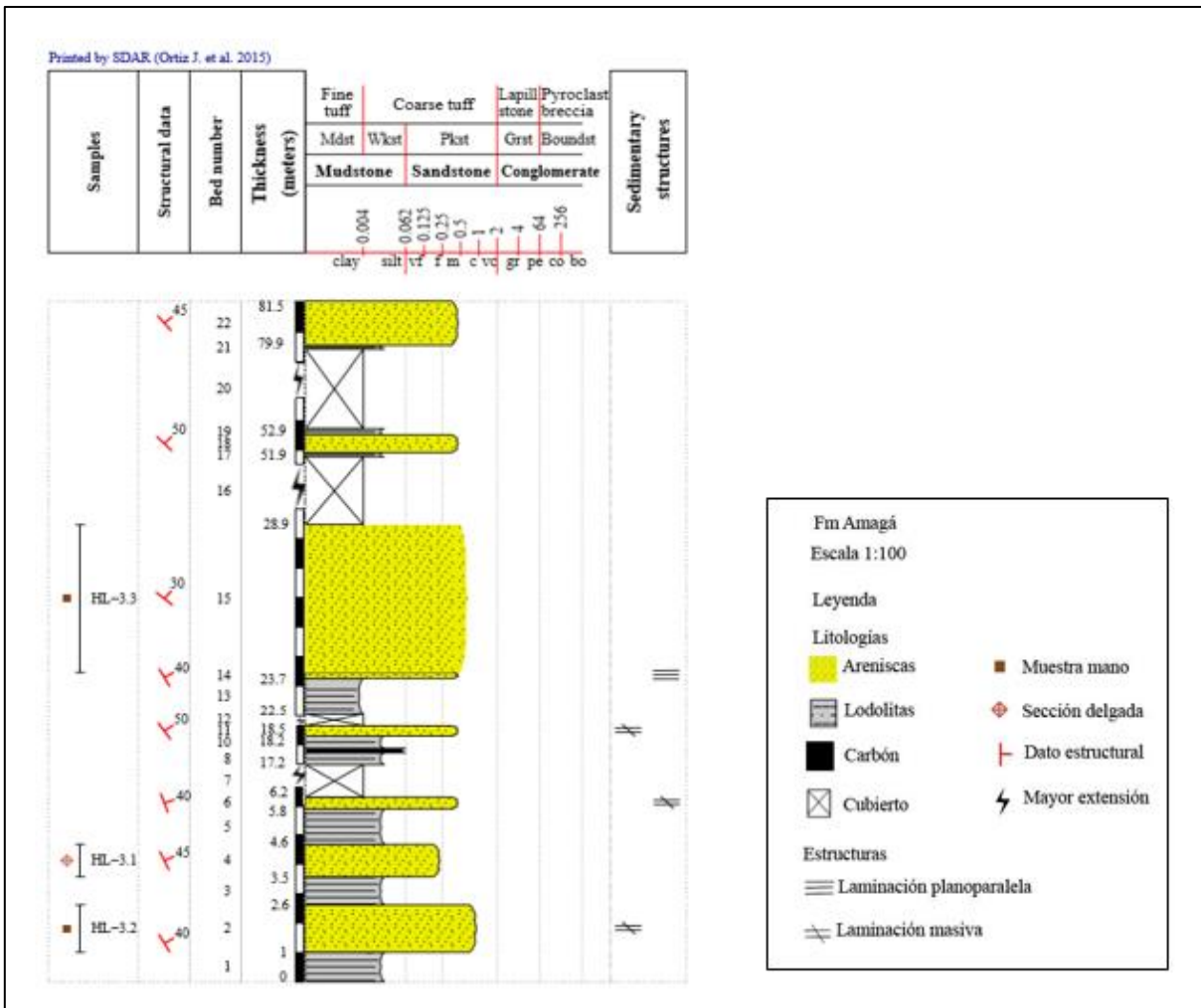


Figura 25. Columna estratigráfica de la sección Vía Horna. (Ver Anexo 6).

### 8.1.1.1 Nivel de lodolitas – mantos de carbón:

Esta sección está compuesta por estratos de lodolitas y estratos de carbón con espesores que varían entre 0,13 m hasta 1,2 m. Las lodolitas presentan tonalidades de gris, amarillo y naranja, son fisibles y en algunos estratos fracturadas. El estrato de carbón presenta una tonalidad negra siendo este de mayor fisibilidad.

Las lodolitas son de color gris amarillento (5Y 8/1), gris verdoso (5BG 5/2), y naranja amarillento (10YR 8/6) producto de los procesos de meteorización asociados a la presencia de óxidos de hierro; son predominantemente masivas y presentan una plasticidad media con una consistencia baja (figura 26 A).

El estrato de carbón es de color negro (N1) y presenta alta fisibilidad (figura 26 B).



**Figura 26.** Nivel de lodolitas y mantos de carbón **A.** Capa de Lodolita representativa de la sección Vía Horna **B.** Capa de carbón de la sección vía Horna.

#### **8.1.1.2 Nivel de areniscas:**

En esta sección se identificaron 8 capas de arenas compuestas principalmente por capas de areniscas finas a gruesas, presentan espesores que varían entre 0,35 m hasta 5 m, se caracterizan por presentar tonalidades blancas, gris y amarillo; capas tabulares e intercalaciones con estratos de lodolitas, los contactos entre estas son predominantemente tajantes.

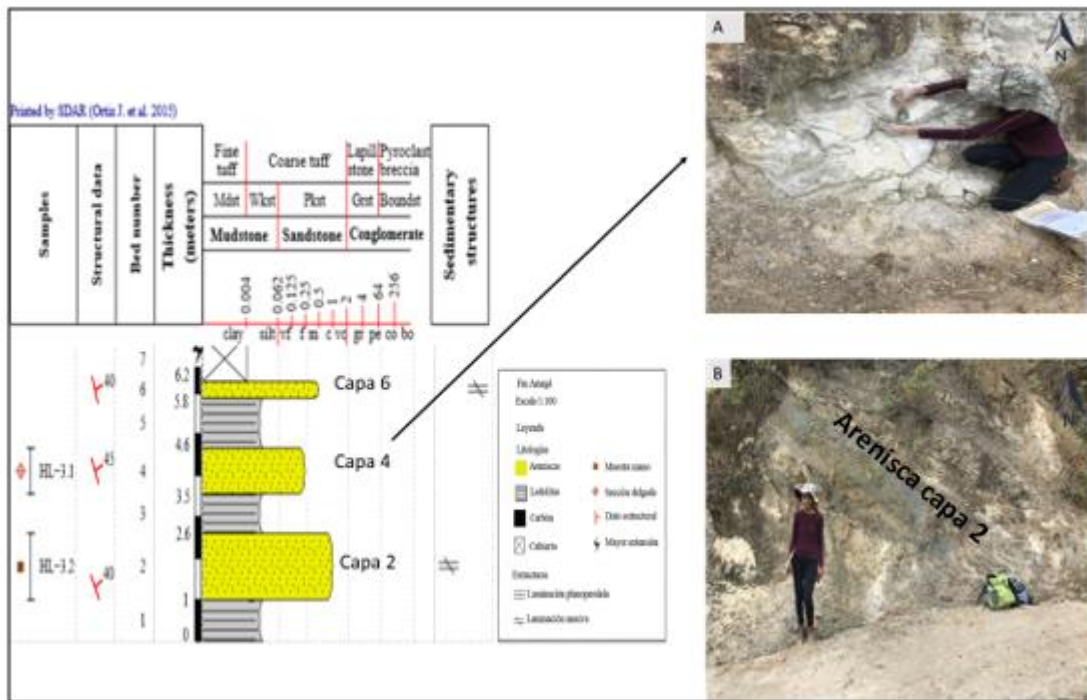
Las areniscas son de color blanco (N9), gris verdoso (5BG 5/2), gris amarillento (5Y 8/1) y amarillo grisáceo (5Y 8/4) asociado a procesos de meteorización, tamaños de grano de fino a grueso; compuestas principalmente por cuarzo y fragmentos líticos sub-redondeado. Cabe resaltar, que las capas que afloran en esta sección no

presentan láminas de carbón en los estratos, el espesor total acumulado de las capas de arena en esta zona es aproximadamente de 10,75 metros.

**Capa 2:** Arenisca tabular con tamaño de grano de medio a grueso, color gris verdoso (5BG 5/2), presenta un espesor de 1,6m, clastos subangulares, compuesta principalmente por cuarzo y fragmentos líticos. Esta presenta un dato estructural N60°W/ 40°NE (figura 27).

**Capa 4:** Arenisca tabular con tamaño de grano fino, color blanco (N9), presenta un espesor de 1,1 m, un grado de compactación muy bajo y teniendo en cuenta las características petrográficas texturales se clasificó como arenisca limosa, presenta un dato estructural N65°W/45° NE (figura 27).

**Capa 6:** Arenisca tabular con tamaño de grano fino a medio, gris verdoso (5BG 5/2), presenta un espesor de 0,4 m, compuesta principalmente por cuarzo (100%), tiene un dato estructural N70°W/40° NE (figura 27).

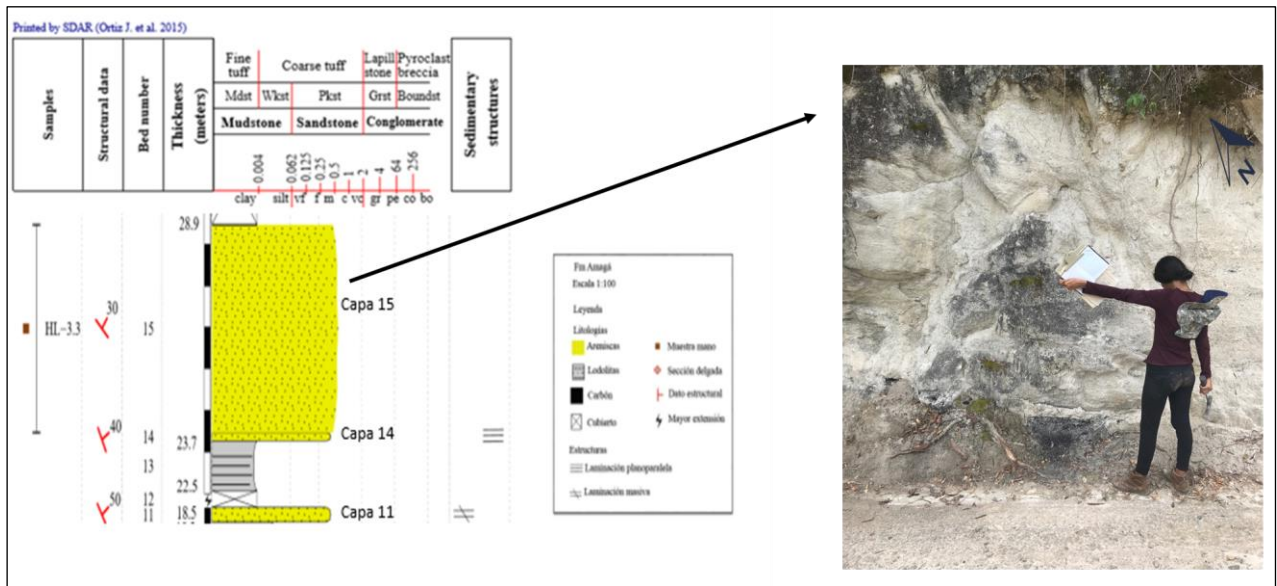


**Figura 27.** Columna estratigráfica de la sección vía Horna capas 2,4 y 6 **A.** Afloramiento representativo capa 4 **B.** Afloramiento representativo de los primeros metros de la sección (0-3,5 m).

**Capa 11:** Arenisca tabular con tamaño de grano fino a medio, color blanco (N1), presenta un espesor de 0,35 m, compuesta principalmente por cuarzo y fragmentos líticos redondeados, y posee un dato estructural N55°W/50° NE (figura 28).

**Capa 14:** Arenisca tabular con tamaño de grano de fino a medio, color gris verdoso (5BG 5/2), presenta un espesor de 0,2 m, compuesta por fragmentos líticos y cuarzo; presenta un dato estructural de N60°W/40°NE (figura 28).

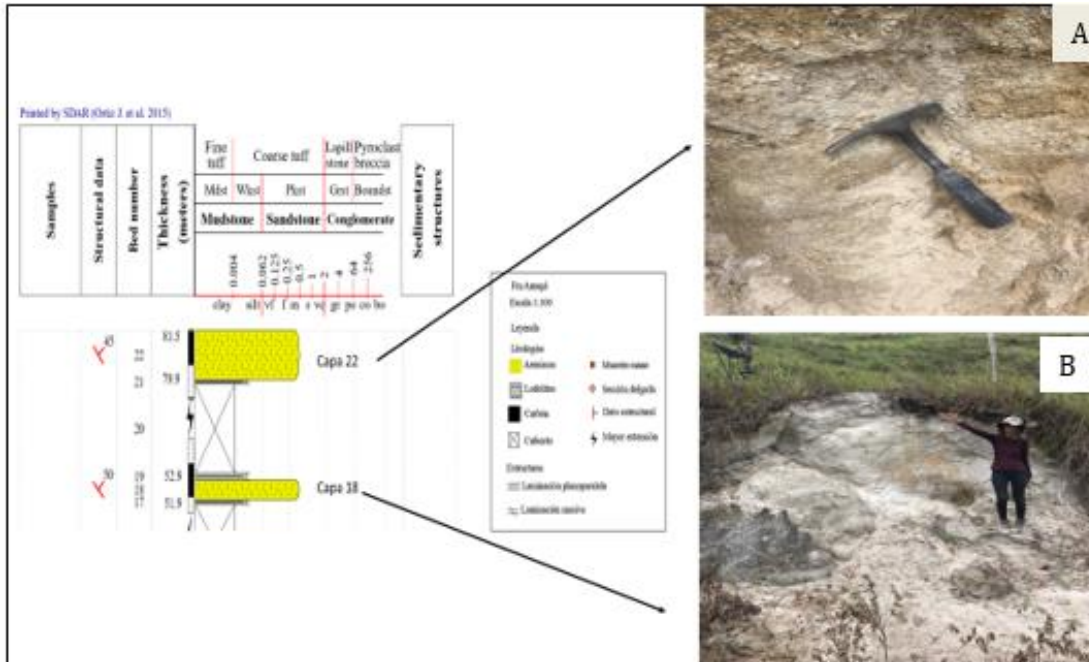
**Capa 15:** Arenisca tabular con tamaño de grano medio, color gris claro (5B 7/1), presenta un espesor de 5 m, compuesta principalmente por cuarzo y fragmentos líticos sub-redondeado, presenta un dato estructural N40°W/30° NE. Cabe resaltar que esta es la capa con mayor espesor en la sección (figura 28).



**Figura 28.** Columna estratigráfica de la sección vía Horna capas 2,4 y 6 **A.** Afloramiento representativo capa 4 **B.** Afloramiento representativo de los primeros metros de la sección (0-3,5 m).

**Capa 18:** Arenisca tabular con tamaño de grano medio, color amarillo grisáceo (5Y 8/4), presenta un espesor de 0,6 m, poco consolidada y presenta un dato de estructural N45°W/50° NE (figura 29).

Capa 22: Arenisca tabular con tamaño de grano fino a medio, color gris claro (5B 7/1), presenta un espesor de 1,5 m, poco consolidada, compuesta por cuarzo y fragmentos líticos, presenta un dato estructural N50°W/45° NE (figura 29).



**Figura 29.** Columna estratigráfica sección vía Horna capas de la 17 a la 22. **A)** Arenisca con fragmentos líticos capa 22 **B)** Afloramiento arenisca capa 18.

Teniendo en cuenta la columna estratigráfica y la descripción de las diferentes litologías, de manera general se identificaron las distintas litofacies y se les asocio un paleoambiente con base en (Miall, 2013):

**Tabla 12.** Código, facies e interpretación de ambientes. Modificado de Corena y Moreno (2019).

Código de las facies	Facies	Estructuras de sedimentarias	Interpretación
<i>Sm</i>	Arena fina a muy gruesa	Masiva	Depósitos de sedimentos de flujos de gravedad
<i>Fl</i>	Areniscas laminadas	Intercalaciones con lodolitas	Depósitos de bancas ríos meándricos
<i>Fl</i>	Areniscas laminadas	Laminación fina	Depósitos de canales abandonados, planicies de inundación
<i>C</i>	Carbón	Plantas	Depósitos de pantanos
<i>Fm</i>	Lodolitas	Estructuras masivas	Llanuras de inundación

Base de la sección (0 – 6,2 m): Predominan las intercalaciones de areniscas finas a medias (FL) y la presencia de laminación masiva, lo cual se asocia a un paleoambiente de ríos meándricos posiblemente relacionado a un depósito de bancas.

Parte media de la sección (6,2 m hasta 28,9): En esta parte de la sección se presentan areniscas de tamaños finos (FL) a medios con laminación masiva y paralela, intercaladas con lodolitas y carbón (C), se asocian a ambientes fluviales de depósitos de planicie y/o canales abandonados con variaciones a pantanos por la presencia de carbón.

Tope de la sección (28,9 – 81,5): En esta parte de la sección las areniscas predominan las intercalaciones de areniscas de tamaño fino a medio (FL) con lodolitas masivas, lo cual se asocia a ambientes fluviales asociados a depósitos de bancas de ríos.

### **8.1.2 Sección estratigráfica Quebrada Juan Baquero**

En la parte central del área de estudio, se levantaron 590,48 metros de espesor de capas compuestas por areniscas, arcillolitas y mantos de carbón (Figura 30); de base a techo está compuesta por:

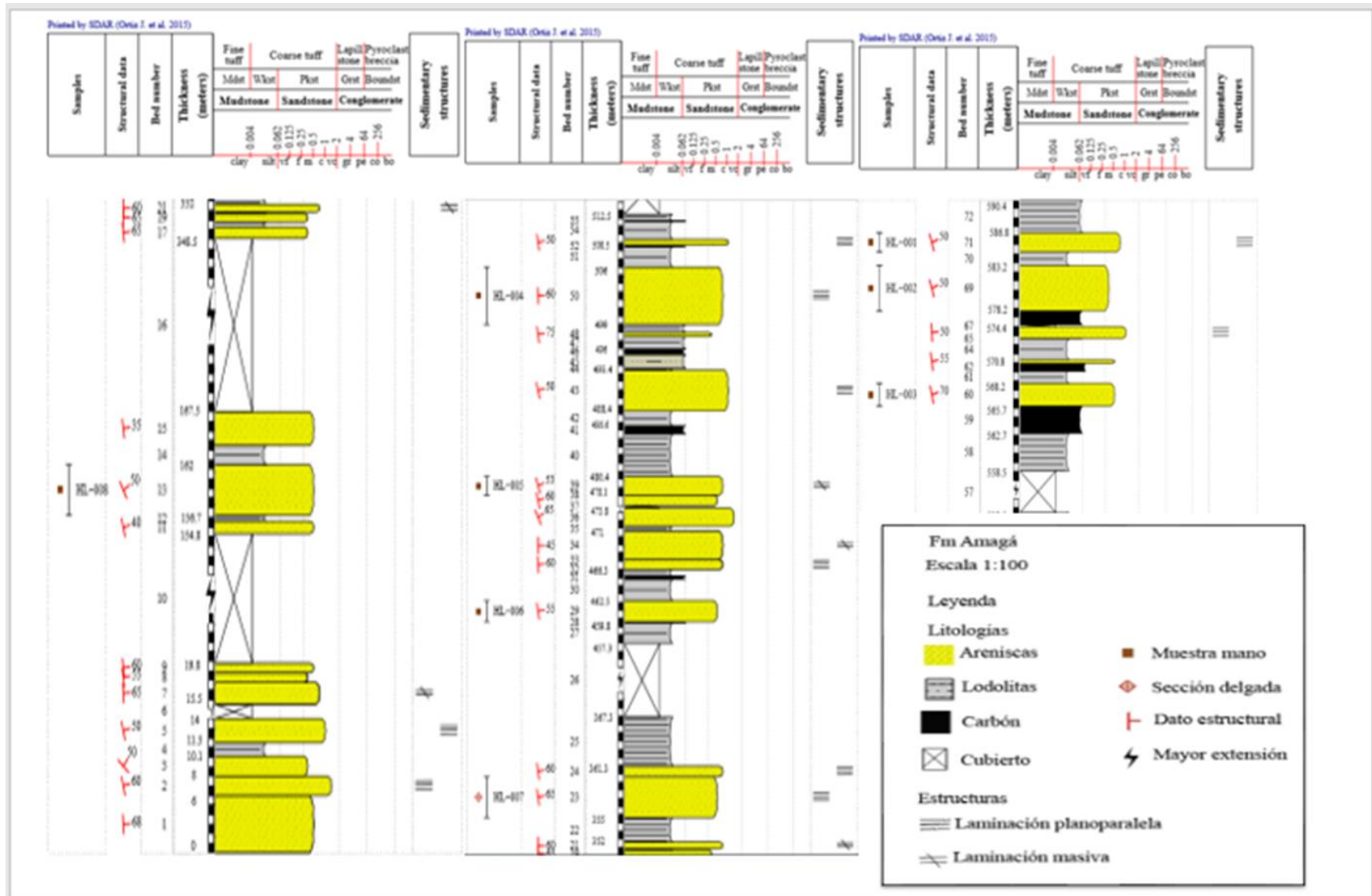


Figura 30. Columna estratigráfica Quebrada Juan Baquero. (Ver anexo 6).

### 8.1.2.1 Nivel de lodolitas:

Esta sección está compuesta por estratos de lodolitas con espesores que varían entre 0,15 m hasta 6 m. Las lodolitas presentan tonalidades preferenciales de gris; se identificaron aproximadamente 25 estratos de lodolitas los cuales van aumentando hacia el tope de la secuencia estratigráfica.

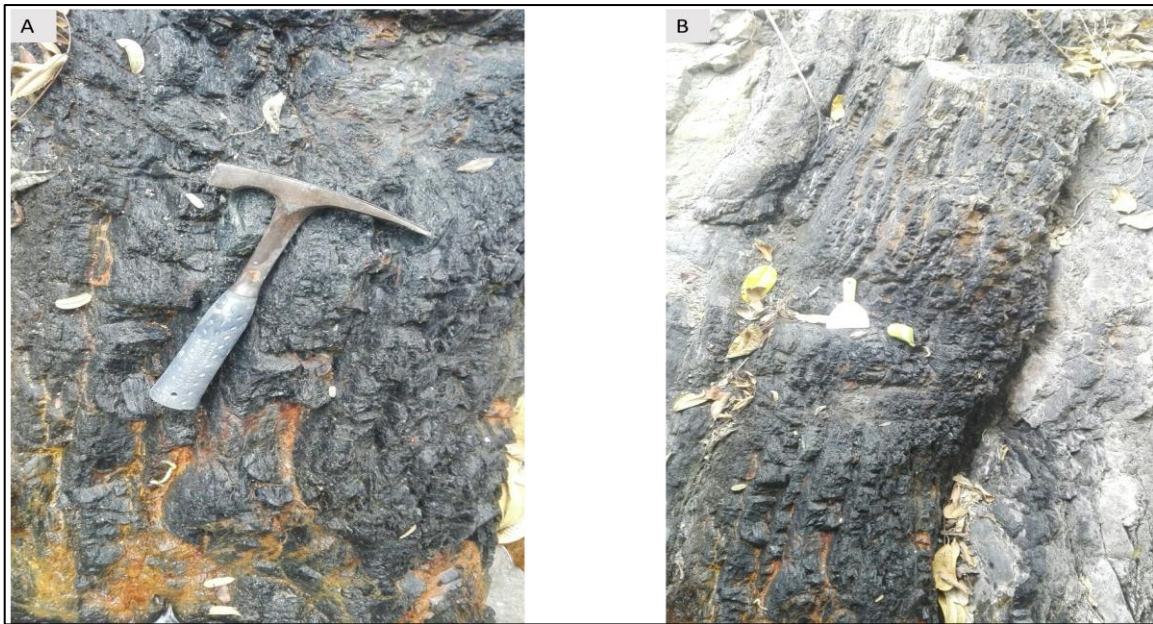
Las lodolitas son de color gris oscuro (N4), gris verdoso (5BG 5/2), y gris azulado (5PB 5/2); estas presentan una fisibilidad media, son preferencialmente masivas con una plasticidad alta y una consistencia entre media a baja. Los estratos de lodolitas en esta parte de la sección presentan un espesor acumulado de 50 m; al igual que en la quebrada aguazul, los procesos de meteorización en esta litología no son tan marcados (Figura 31).



**Figura 31.** Lodolitas de la sección Quebrada Juan Baquero. **A)** Capa de Lodolita al tope sección **B)** Capa de Lodolita en la parte media de la sección **C)** Capa de Lodolita en la base de la sección.

### 8.1.2.2 Nivel de mantos de carbón

En esta sección afloran 10 mantos de carbón los cuales presentan espesores que varían entre 0,1 m hasta 3 m. Los estratos de carbón son de color negro (N1) y predominan hacia el tope de la sección estratigráfica (figura 32).



**Figura 32.** Mantos de Carbón Quebrada Juan Baquero. **A)** capa de carbón base de la sección. **B)** Capa de carbón parte media de la sección.

### 8.1.2.3 Nivel de areniscas

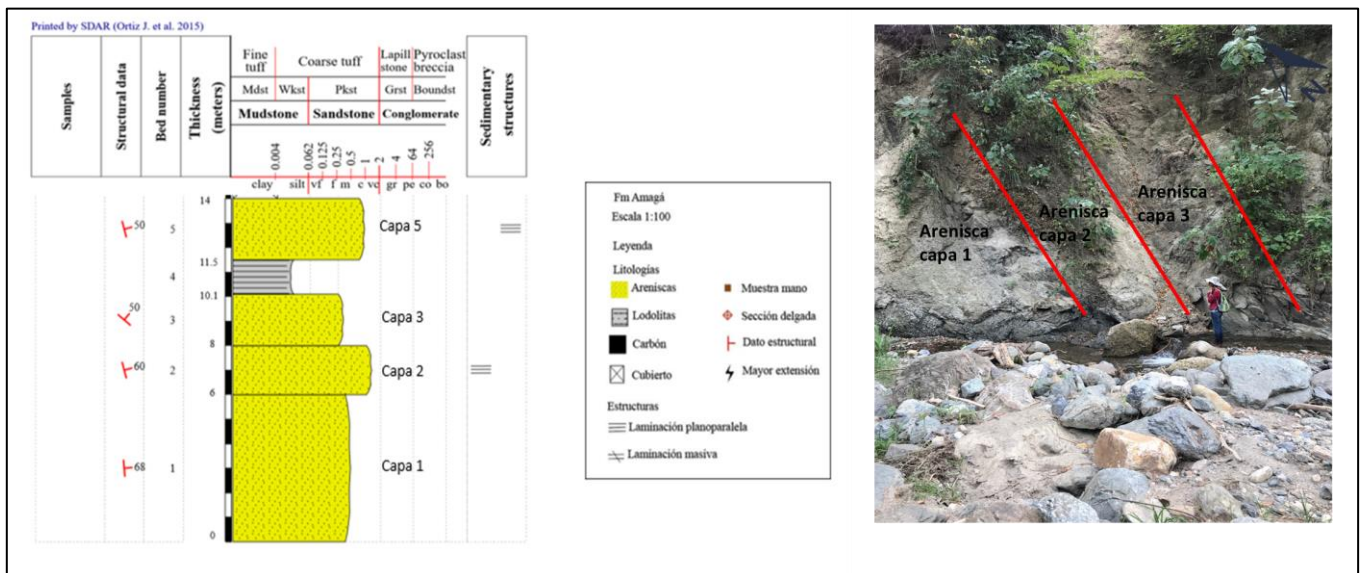
En esta sección se identificaron 30 estratos de areniscas compuestas principalmente por areniscas que varían de finas a gruesas, presentan espesores que varían entre 0,4 m y 7 m, se caracterizan por presentar tonalidades blancas, grisáceas y amarillas; los contactos con las otras capas son preferencialmente tajantes, es común encontrar capas con presencia de láminas de carbón y fragmentos líticos.

Las areniscas son de color blanco (N9), gris amarillento pálido (5Y 7/2), gris amarillento (5Y 8/1), naranja amarillento pálido 10YR 8/6, amarillo verdoso (10Y 7/4) y naranja pálido (10YR 8/2) lo cual se asocia a la presencia de óxidos. La composición de las areniscas es principalmente cuarzo y fragmentos líticos que varían entre subangulares a sub-redondeados. El espesor total acumulado de los estratos de arena es de 70 m.

**Capas 1 y 5:** Estratos de areniscas con tamaños de grano de fino a medio, color gris amarillento (5Y 7/2). La capa 1 presenta un espesor de 6 m y la capa 5 de 2,5 m; estas se caracterizan por presentar fragmentos líticos subredondeados y cuarzo. Los datos estructurales de estas capas son N55°W/68°NE y N70°W/50° NE respectivamente (figura 33).

**Capa 2:** Estrato de arenisca tabular con tamaño de grano grueso, color naranja pálido (10YR 8/2), presenta un espesor de 2 m y laminación paralela, compuesta principalmente por cuarzo y fragmentos líticos, posee un dato estructural N70W/ 60° NE (figura 33).

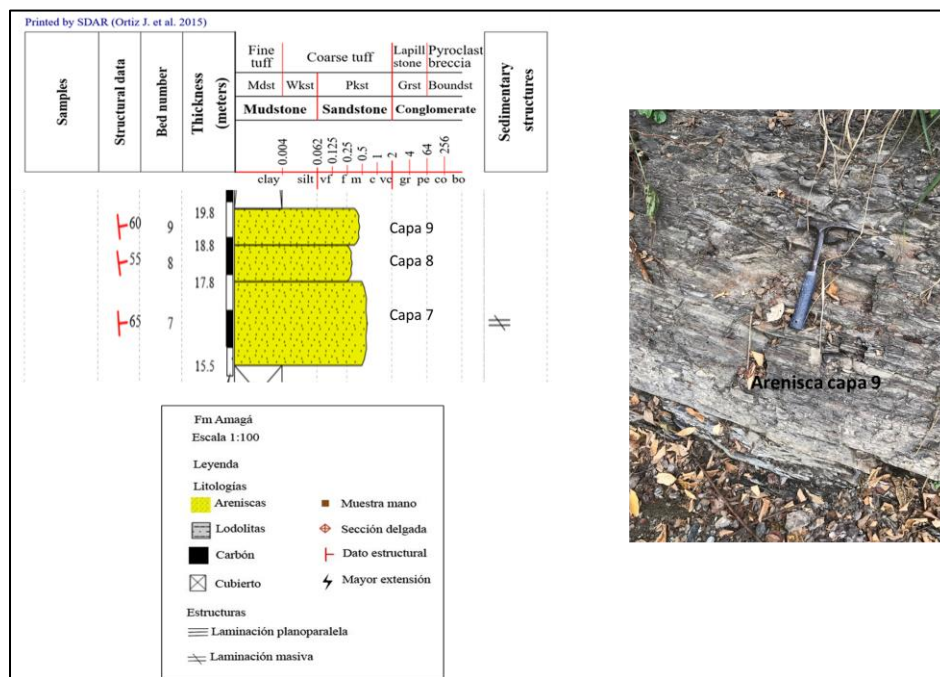
**Capa 3:** Estrato de arenisca tabular con tamaño de grano de fino, color naranja pálido (10YR 8/2), presenta un espesor de 2,1 m, se caracteriza por presentar intercalaciones de láminas de carbón y un dato estructural de N40W/50° NE (figura 33).



**Figura 33.** Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 1 a la 5. Afloramiento de los primeros metros de la sección.

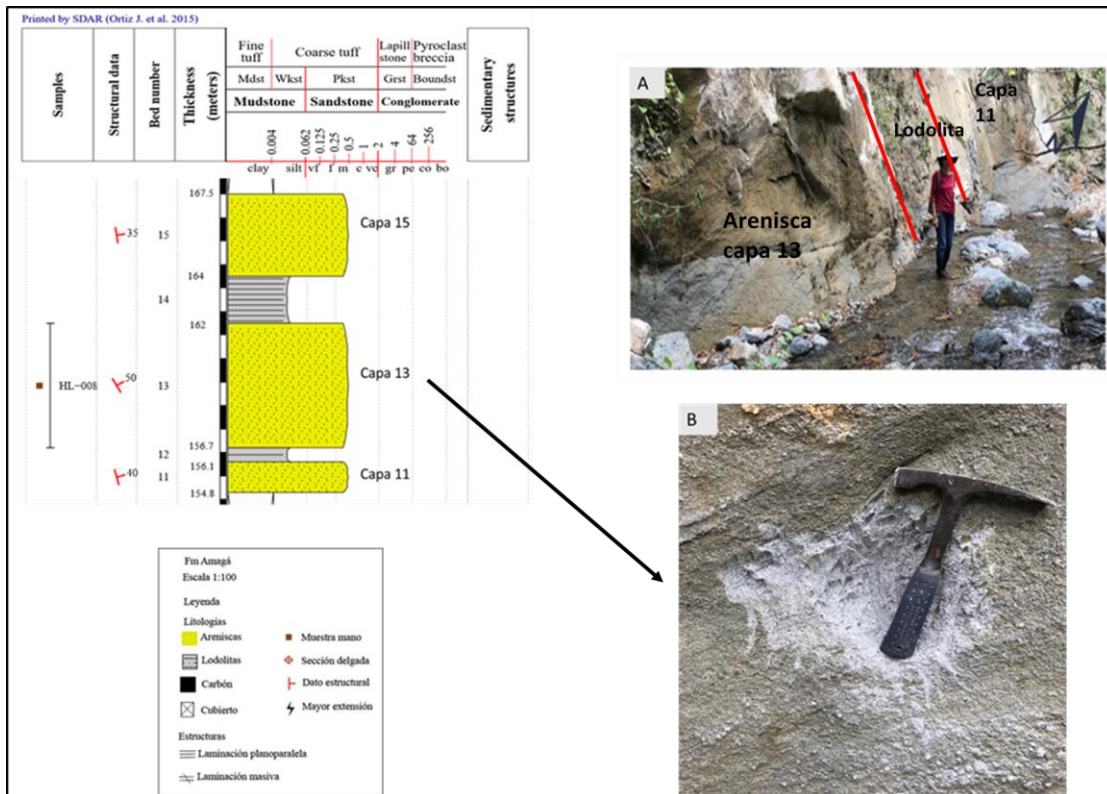
Capas 7 y 9: Estratos de arenisca similares con tamaño de grano de medio, la capa 7 un color gris amarillento pálido (5Y 8/1) y un espesor de 2,3 m; la capa 9 un color gris amarillento (5Y 8/1) y un espesor de 1 m. Estas capas se caracterizan por presentar fragmentos líticos y intercalaciones de láminas de carbón. Los datos estructurales de estas capas son N55°W/65°NE y N50W/60°NE respectivamente (figura 34).

Capa 8: Arenisca tabular con tamaño de grano fino a medio, color naranja pálido (10YR 8/2)), presenta un espesor de 1 m, presenta intercalaciones de láminas de carbón, poco consolidada y presenta un dato estructural de N65°W/55°NE (figura 34).



**Figura 34.** Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 7 a la 9 y Afloramiento arenisca capa 9.

Capas 11,13 y 15: Estratos de arenisca similares de grano fino a medio, presentan un color amarillo verdoso (10Y 7/4). Las capas presentan un espesor de 1,3 m, 5,3 m y 3,5 m respectivamente. Estas capas se caracterizan por presentar fragmentos líticos y laminaciones de carbón. Los respectivos datos estructurales para estas capas son de N75°W/40°NE, N60°W/50°NE y N80°W/35° NE (figura 35).

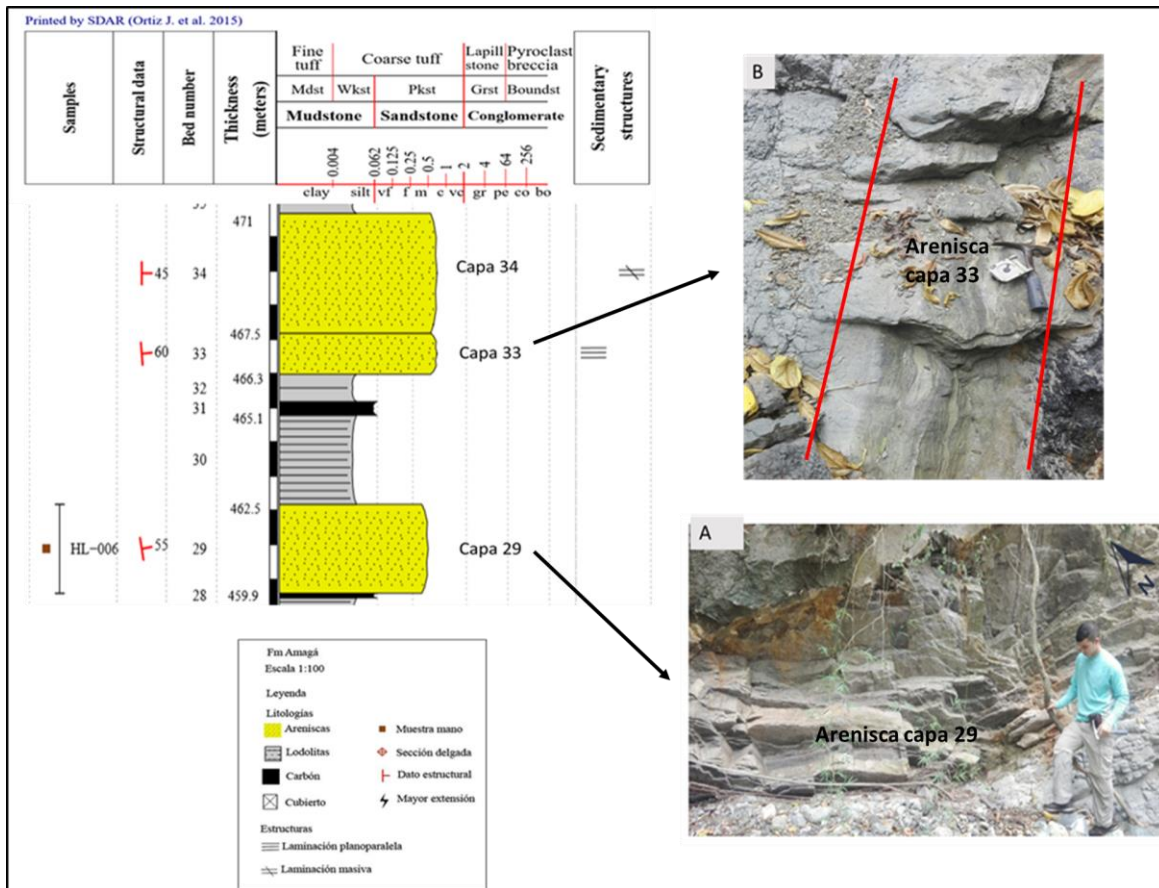


**Figura 35.** Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 11 a la 15. **A)** Afloramiento de las capas 11 a la 15. **B)** Arenisca capa 13.

*Capas 17 y 24:* Estratos de arenisca similares con tamaño de grano de fino a medio, la capa 17 presenta un color naranja amarillento (10YR 8/6), mientras que la capa 24 un color gris amarillento pálido (5Y 7/2), ambas capas poseen un espesor de 1,3 m. Estos estratos presentan fragmentos líticos, láminas de carbón y cuarzo. Los respectivos datos de estructurales son N80W/65°NE y N75W/60°NE (figura 36).

*Capas 19 y 23:* Estratos de arenisca con tamaño de fino a medio, la capa 19 presenta un color naranja amarillento pálido (10YR 8/6) y un espesor de 0,9 m; mientras que la capa 23 presenta un color amarillo verdoso (10Y 7/4) con un espesor de 5 m. Se caracterizan por presentar laminaciones de carbón y un ángulo de buzamiento de 65° NE (figura 36).



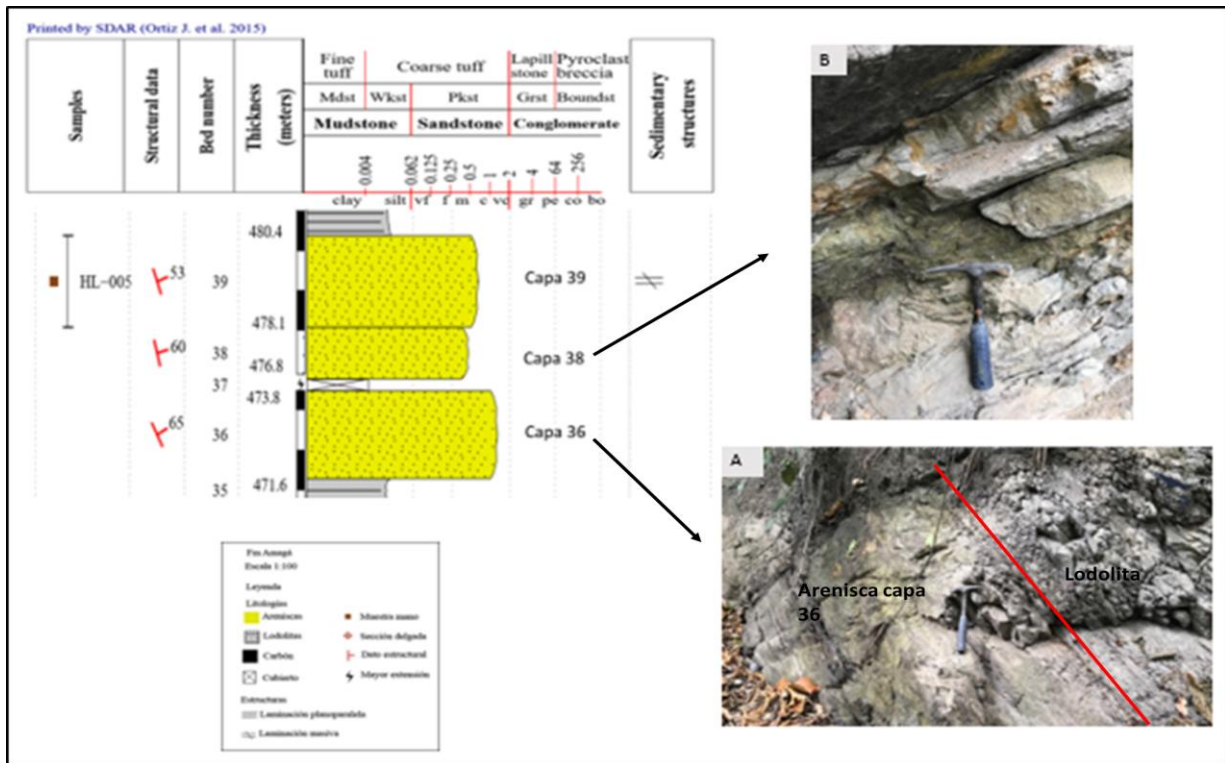


**Figura 37.** Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 28 a la 34. **A)** Afloramiento arenisca capa 29 **B)** Arenisca capa 33.

Capa 36: Arenisca tabular con tamaño de grano medio a grueso, ambas capas presentan un color gris amarillento pálido (5Y 7/2) y un espesor de 2,2 m. Se caracterizan por presentar fragmentos líticos subredondeados, laminaciones de carbón; presenta un dato de estructural de N75W/65°NE (figura 38).

Capa 38: Arenisca tabular con tamaño de grano de fino a medio, color gris amarillento pálido (5Y 7/2), poco consolidada, presenta un espesor de 1,3. Esta capa no presenta laminación de carbón, compuesta por cuarzo y tiene un dato de estructural de N70°W/60° NE (figura 38).

Capa 39: Arenisca tabular con tamaño de grano medio, color gris amarillento (5Y 8/1), un espesor de 2,3 m y un dato estructural de N70°W/53°NE. Se caracteriza por presentar óxidos, fragmentos líticos subredondeados y cuarzo (figura 38).

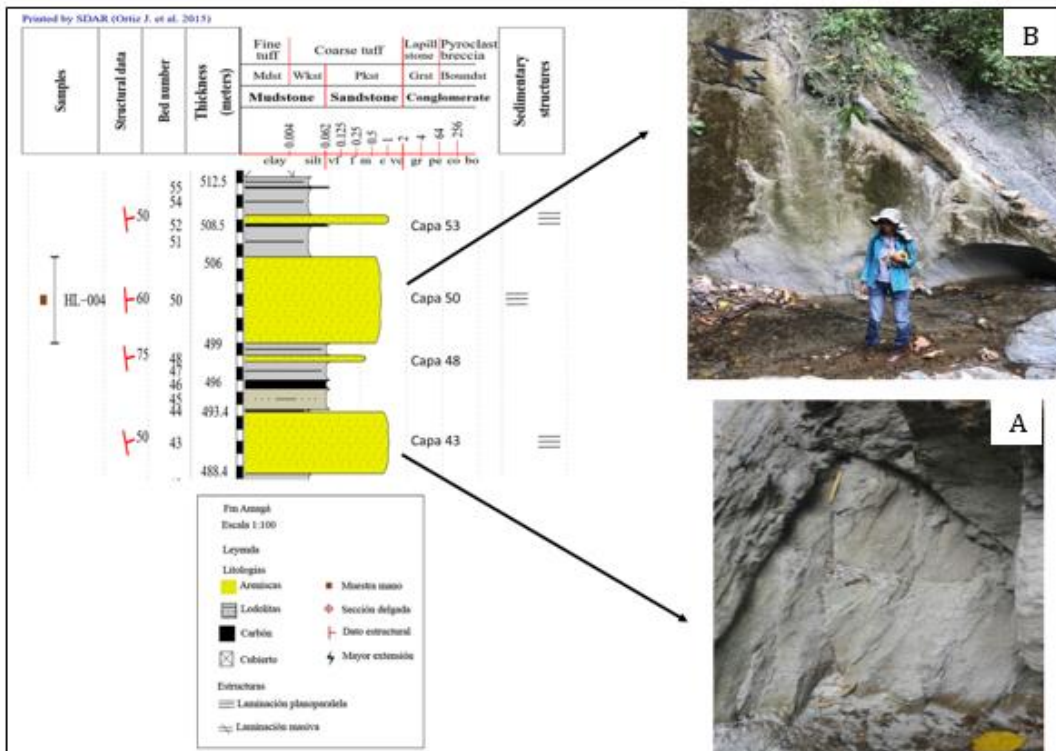


**Figura 38.** Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 36 a la 39. **A)** Afloramiento arenisca capa 36 **B)** Afloramiento arenisca capa 38.

Capas 43 y 50: Estratos de areniscas similares con tamaño de grano de medio a grueso, color gris opaco (N8), poco meteorizada, consolidación media. Se encuentran compuestas por láminas de carbón y cuarzo. La capa 43 presenta un espesor de 5 m y un dato estructural de N70°W/50°NE; mientras que la capa 50 un espesor de 7 m con un dato de estructural de N85°W/60° NE. Cabe resaltar que estas dos capas son las de mayor espesor en la sección estratigráfica (figura 39).

Capa 48: Arenisca lenticular de grano fino, color blanco (N9), un espesor de 0,5 poco meteorizada, consolidación alta y un dato estructural de N65°W/75°. Se encuentra compuesta principalmente por cuarzo y fragmentos líticos en muy baja cantidad (figura 39).

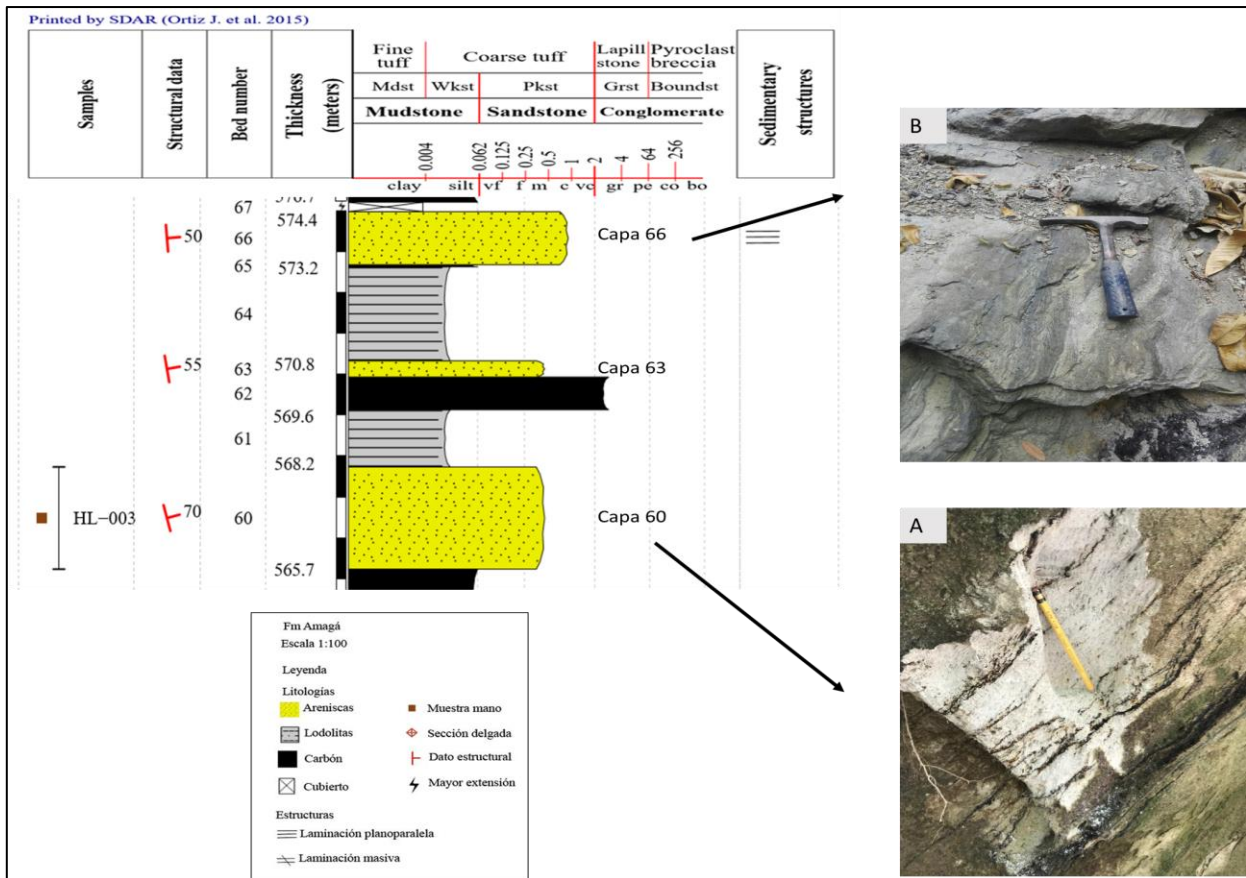
Capas 53: Arenisca lenticular de grano medio a grueso, color gris amarillento (5Y 8/1), un espesor de 0,7 m, consolidación media y un dato estructural de N80°W/75°NE. Se encuentra compuesta por cuarzo y fragmentos líticos (figura 39).



**Figura 39.** Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 43 a la 55. **A)** Afloramiento arenisca capa 43 **B)** Afloramiento arenisca capa 50.

**Capa 60:** Arenisca tabular con tamaño de grano de fino a medio, color gris amarillento (5Y 8/1), presenta un espesor de 2,5 m y un dato estructural N75°W/70NE. Esta capa se encuentra compuesta por fragmentos líticos subredondeados, laminaciones de carbón y cuarzo (figura 40).

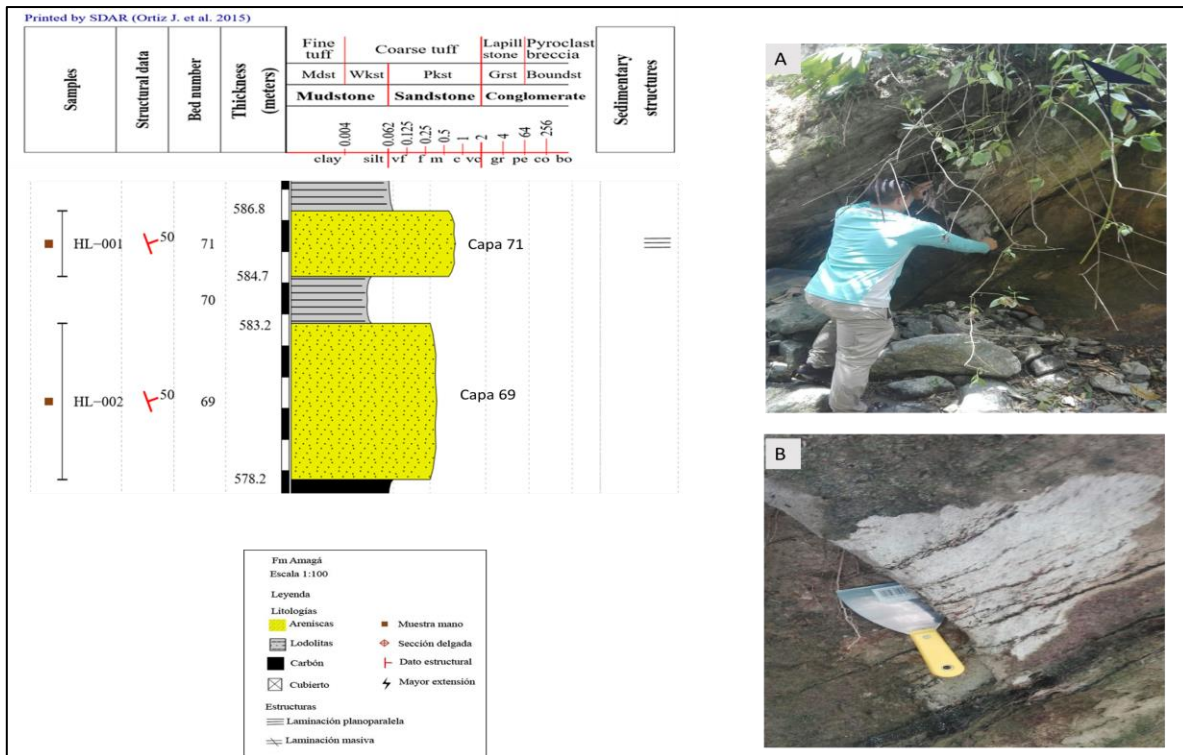
**Capas 63 y 69:** Estratos de arenisca de tamaño fino, ambas capas con color gris amarillento (5Y 8/1) asociadas a una baja meteorización. La capa 63 presenta un espesor de 0,4 m y un dato de estructural de N80°W/55°NE; mientras que la capa 69 un espesor de 5 m y un dato de estructural de N80°W/50°NE. Estas capas se encuentran compuestas por laminaciones de carbón y cuarzo (figura 40).



**Figura 40.** Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 60 a la 67.

**A)** Afloramiento arenisca capa 60 **B)** Afloramiento arenisca capa 66.

*Capas 69 y 71:* Estratos de arenisca de tamaño medio a grueso, la capa 69 presenta un color gris opaco (N8) y un espesor de 5 m; mientras que la capa 71 un color gris amarillento pálido (5Y 7/2) y un espesor de 2,1m. Estas capas se caracterizan por presentar laminaciones de carbón, cuarzo y fragmentos líticos en menor proporción. Los datos estructurales para estas capas son N70°W/ 50°NE para ambas (figura 41).



**Figura 41.** Columna estratigráfica sección Quebrada Juan Baquero capas de la 69 a la 72. **A)** Afloramiento arenisca capa 71 **B)** Afloramiento arenisca capa 69.

Teniendo en cuenta la columna estratigráfica y la descripción de las diferentes litologías, de manera general se identificaron las diferentes litofacies y se les asocio un paleo-ambiente teniendo en cuenta lo planteado por (Miall, 2013):

**Tabla 13.** Código, facies e interpretación de ambientes. Modificado de Corena y Moreno (2019).

Código de las facies	Facies	Estructuras de sedimentarias	Interpretación
<i>Sm</i>	Arena fina a muy gruesa	Masiva	Depósitos de sedimentos de flujos de gravedad
<i>Fl</i>	Areniscas laminadas	Intercalaciones con lodolitas	Depósitos de bancas ríos meándricos
<i>Fl</i>	Areniscas laminadas	Laminación fina	Depósitos de canales abandonados, planicies de inundación
<i>C</i>	Carbón	Plantas	Depósitos de pantanos
<i>Fm</i>	Lodolitas	Estructuras masivas	Llanuras de inundación

Base de la sección (0 – 167,5 m): En esta parte de la sección predominan las areniscas con tamaño de grano de fino a medio (FI) con presencia de laminaciones de carbón (C) y fragmentos líticos, se interpretan como ambientes fluviales de depósitos de canales abandonados y planicies de inundación.

Parte intermedia de la sección (167,5 m – 367,3): En esta parte de la sección se presentan areniscas de tamaño fino a medio (FI) con presencia laminaciones de carbón, estratificación masiva y plano-paralela, intercaladas con Lodolitas (Fm). Estas pueden ser asociadas a litofacies de depósitos de canales abandonados y llanuras de inundación con variaciones a depósitos de pantano por la presencia de carbón.

Parte media de la sección (367,3 – 512,5): En esta parte de la sección se presentan estratos de areniscas de tamaño fino a grueso (Sm- FL), intercalaciones de lodolitas (Fm) y mayor presencia de estratos de carbón (C), las cuales se asocian a depósitos de sedimentos por gravedad, depósitos de bancas de ríos meándricos con variaciones a depósitos de pantanos.

Tope de la sección (512,5 m – 590,4 m): En esta parte de la sección se presentan estratos de areniscas de tamaño fino a grueso con estratificación masiva (Sm - FI) con estratos de lodolitas y estratos de carbón (C), las cuales se asocian a ambientes fluviales de depósitos de sedimentos por gravedad, depósitos de bancas de ríos meándricos y depósitos asociados a pantanos.

### **8.1.3 Sección estratigráfica Quebrada Aguazul**

En la parte más Norte del área de estudio, se levantaron 303.1 metros de espesor de capas compuestas por areniscas, arcillolitas y mantos de carbón (Figura 42); de base a techo está compuesta por:

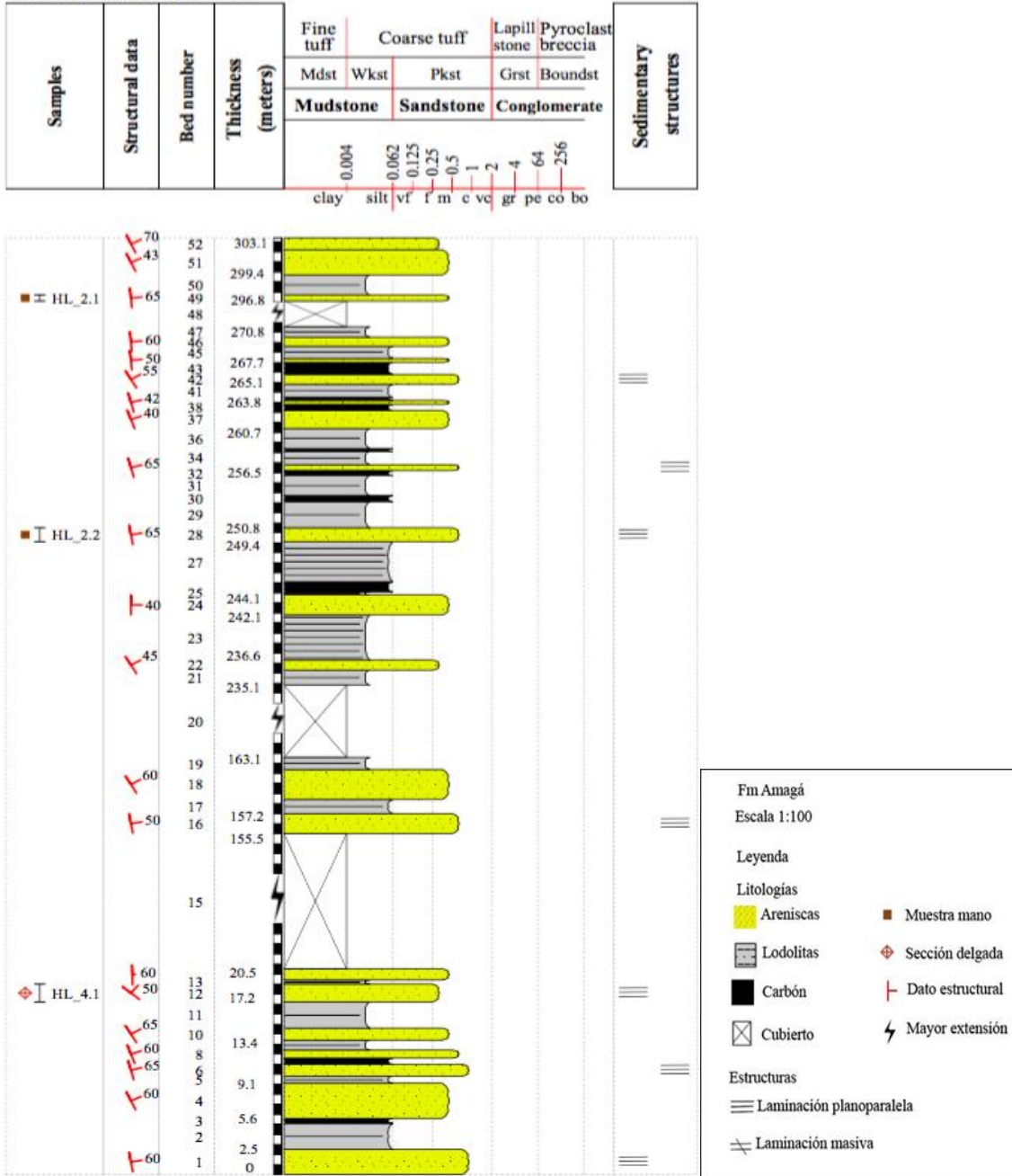


Figura 42. Columna estratigráfica Quebrada Aguazul. (Ver anexo 6).

### 8.3.2.1 Nivel de lodolitas:

Esta sección está compuesta por estratos de lodolitas con espesores que varían entre 0,3 m hasta 4,5 m. Las lodolitas presentan tonalidades preferenciales de gris, se identificaron aproximadamente 19 estratos de lodolitas los cuales afloran tanto en la base, como en la parte media y alta de la sección estratigráfica.

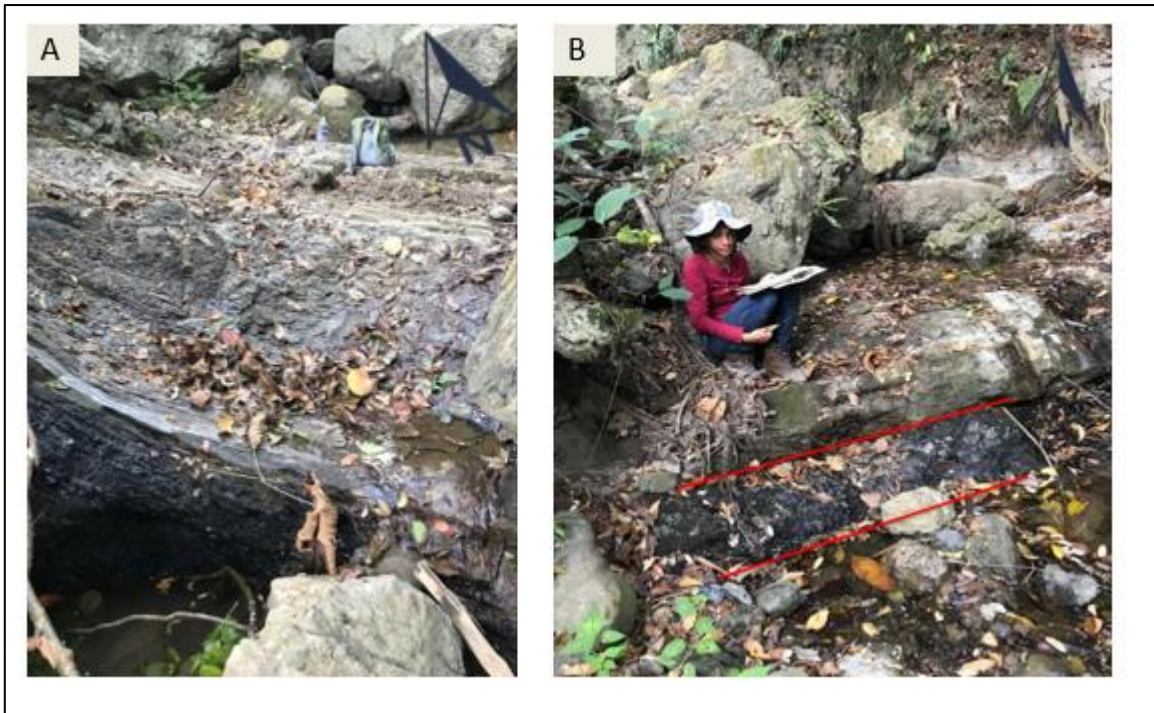
Las lodolitas son de color gris claro (N6), gris verdoso (5BG 5/2), y gris azulado (5B 5/1), fisibilidad media, son preferencialmente masivas con una plasticidad alta y una consistencia alta, cabe resaltar que en esta sección los procesos de meteorización en estos materiales no son tan marcado (Figura 43).



**Figura 43.** Lodolitas representativas Quebrada Aguazul **A)** Lodolitas masivas del tope de la sección **B)** Lodolitas fracturadas de la parte media de la sección.

### 8.1.3.2 Nivel de mantos de carbón

En esta sección afloran 9 mantos de carbón los cuales presentan espesores que varían entre 0,3 m hasta 1,2 m. Los estratos de carbón son de color negro (N1) y predominan hacia el tope de la sección estratigráfica (Figura 44).



**Figura 44.** Carbón representativos Quebrada Aguazul **A)** Afloramiento capa de carbón al tope de la sección **B)** Afloramiento capa de carbón de la parte media de la sección.

### 8.1.3.3 Nivel de areniscas

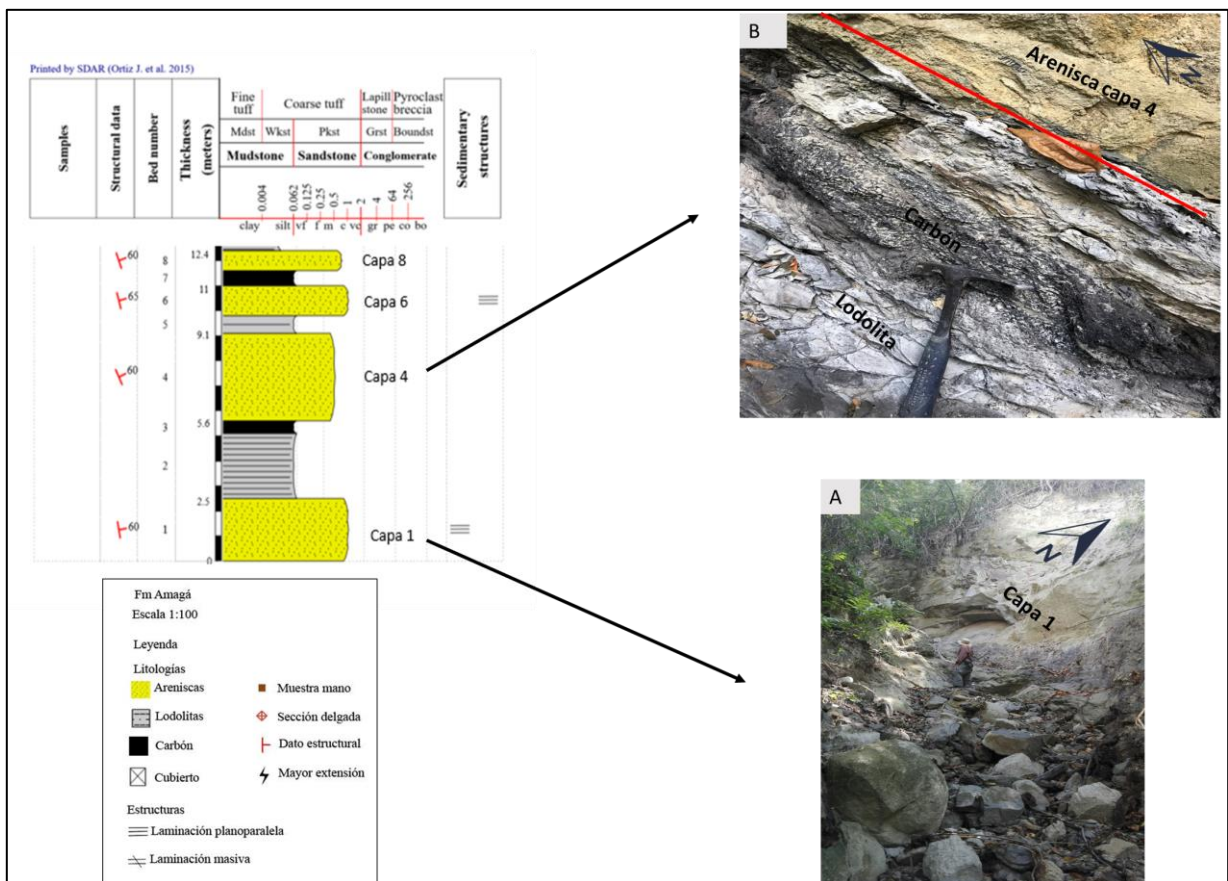
En esta sección se identificaron 21 estratos de areniscas compuestas principalmente por areniscas finas a gruesas, presentan espesores que varían entre 0,4 m y 3,5 m, se caracterizan por presentar tonalidades blancas, grisáceas y amarillas, los contactos con las otras capas son preferencialmente tajantes, es común encontrar capas con presencia de láminas de carbón.

Las areniscas son de color blanco (N9), gris amarillento (5Y 7/2), gris verdoso (5BG 5/2), gris amarillento (5Y 8/1 y naranja amarillento (10YR 8/6) lo cual se asocia a la presencia de óxidos, se encuentran compuesta principalmente por cuarzo y fragmentos líticos que varían entre subangular a subredondeados. El espesor total acumulado de los estratos de arena es de 30,5 m.

Capas 1 y 6: Estratos de arenisca similares con tamaño de grano de medio a grueso, color blanco (N9) y gris verdoso (5BG 5/2) respectivamente. La capa 1 presenta un

espesor de 2,5 m y la capa 6 un espesor de 1,2 m; se caracterizan por presentar intercalaciones de láminas de carbón; los datos estructurales son N80°W/60° NE y N75°W/65° NE respectivamente (Figura 45).

Capas 4 y 8: Estratos de arenisca con tamaño de fino a medio, color blanco (N9) y naranja amarillento (10YR 8/6) respectivamente. La capa 4 presenta un espesor de 3,5 m y la capa 8 de 0,8 m; se caracterizan por presentar intercalaciones de láminas de carbón y poca compactación. Los datos estructurales son N65°W/60°NE y N70°W/60°NE respectivamente (Figura 45).

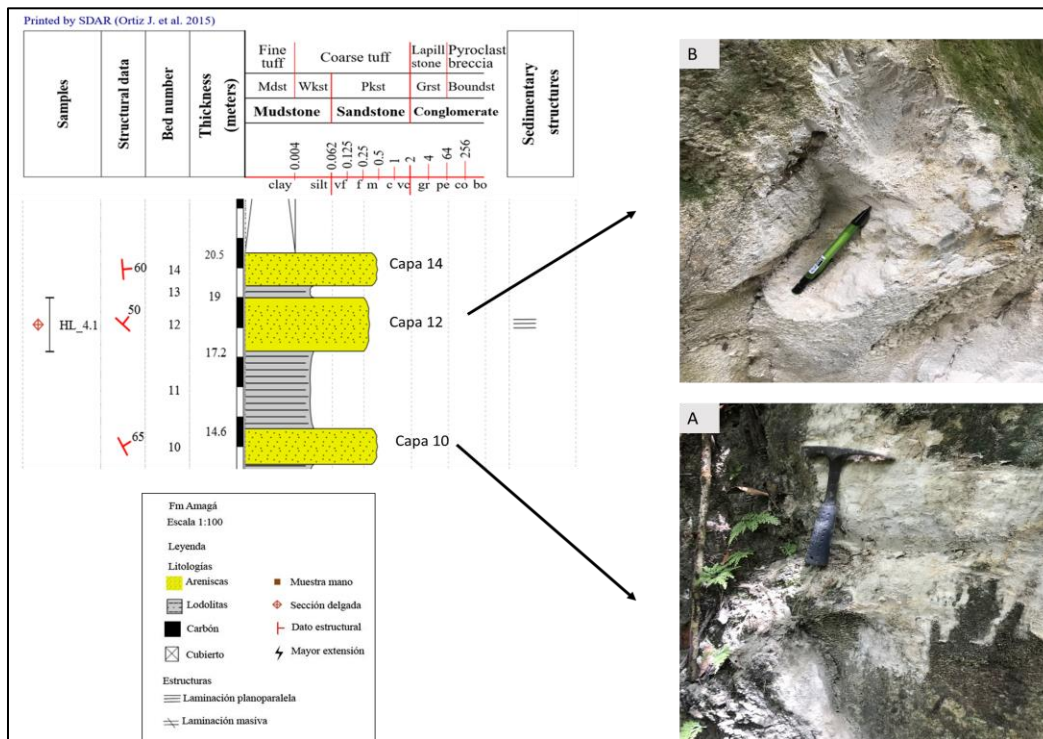


**Figura 45.** Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 1 a la 8. **A)** Afloramiento arenisca capa 3 **B)** Afloramiento capas 2,3 y 4.

Capas 10, 12, y 14: Estratos de arenisca de tamaño de fino a medio, la capa 10 y 14 presentan un color blanco (N9) y un espesor de 1,2 m, mientras que la capa 12 un color naranja amarillento (10YR 8/6) y un espesor de 1,8 m. Estos estratos se caracterizan por presentar fragmentos líticos subredondeados y no exhibir

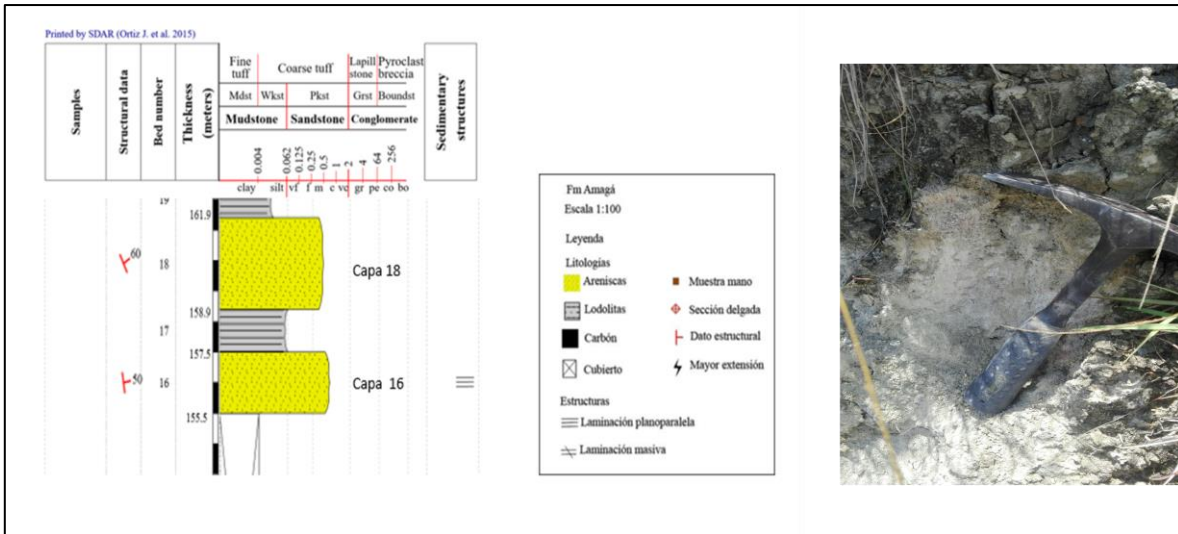
intercalaciones de láminas de carbón. Los respectivos datos estructurales para estas capas son de N75°W/65° NE, N45°W/50°NE y N75°W/60°NE.

Cabe destacar, que al realizar el análisis petrográfico textural para la muestra HL\_4.1 recolectada en la capa 12 esta se clasifico como arenisca limosa (figura 46)



**Figura 46.** Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 10 a la 14. **A)** Afloramiento arenisca capa 10. **B)** Afloramiento arenisca capa 12.

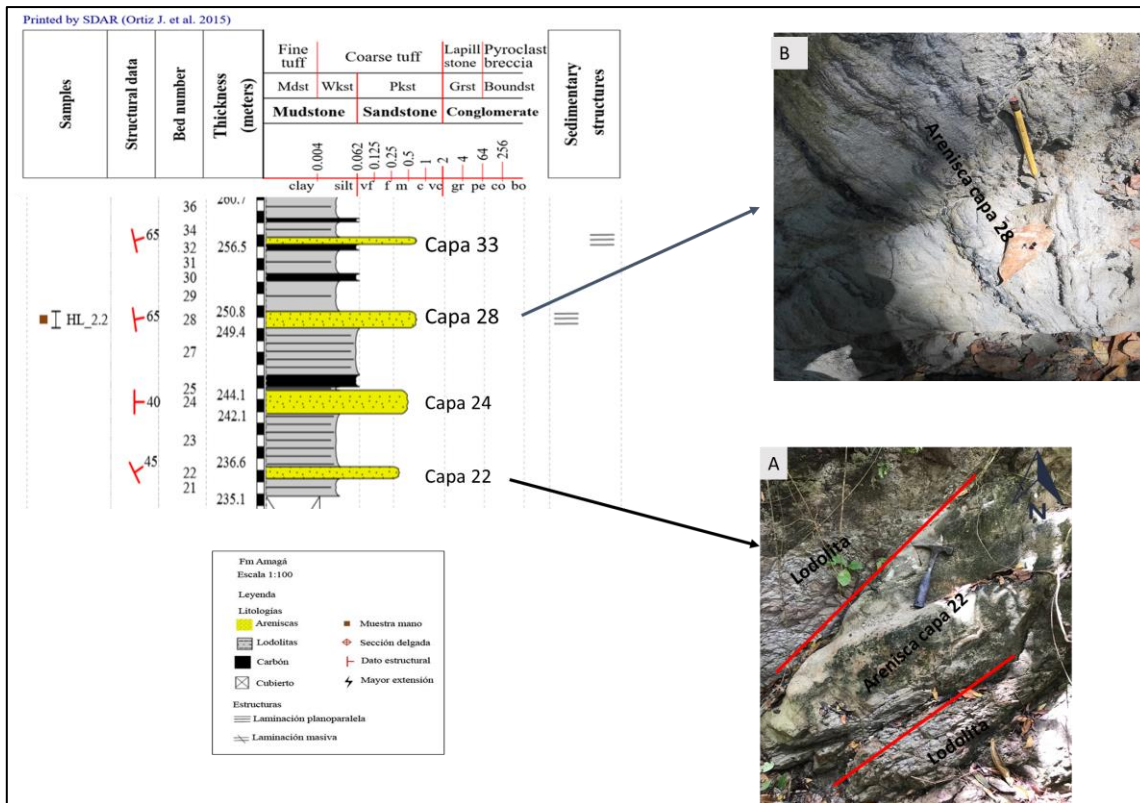
Capas 16 y 18: Estratos de arenisca de tamaño fino a medio, la capa 16 presenta un color gris verdoso (5BG 5/2), laminación masiva y un espesor de 2 m; la capa 18 un color blanco (N9) y un espesor de 3 m. Estos estratos no presentan intercalaciones de carbón, pero si presentan fragmentos líticos subredondeados; los respectivos datos estructurales para estas capas son N70°W/ 50° NE y N65°W/ 60° NE (figura 47).



**Figura 47.** Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 16 a la 19 y afloramiento arenisca capa 16.

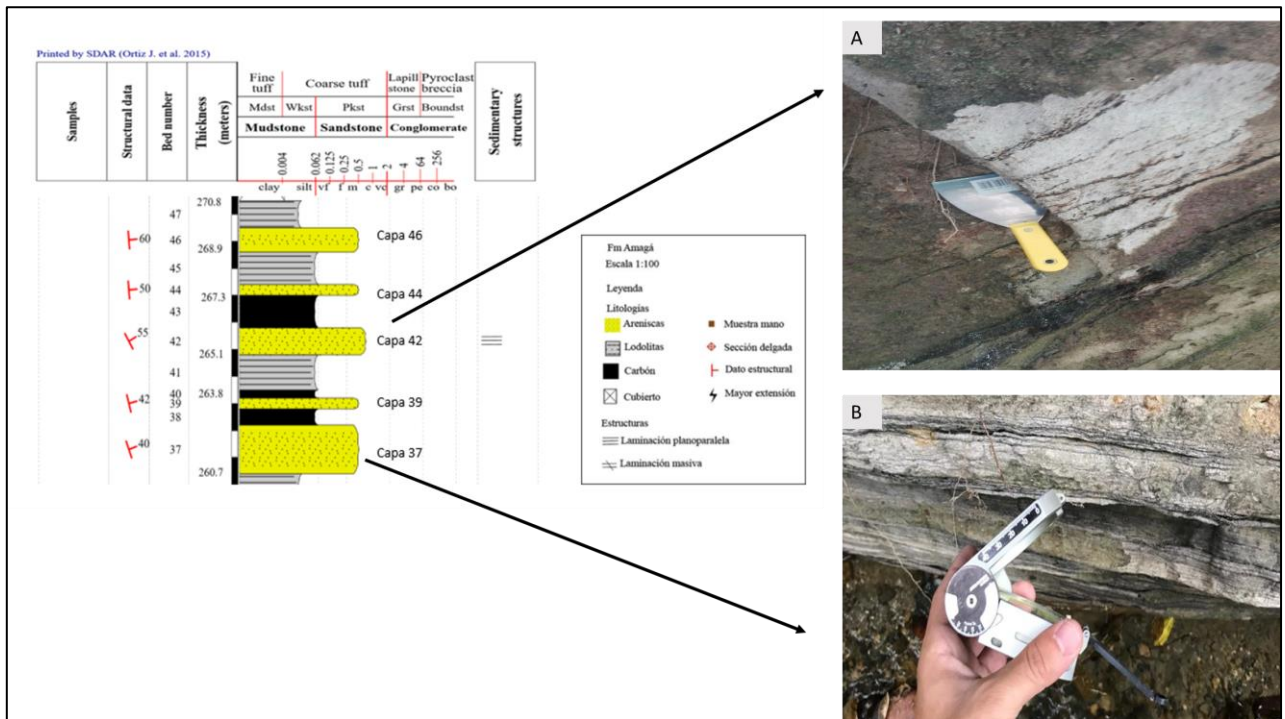
Capas 22 y 24: Estratos de arenisca de tamaño fino a medio, la capa 22 presenta un color gris amarillento (5Y 7/2) y un espesor de 1 m; la capa 24 se le asocia un color blanco (N9) y un espesor de 2 m. Estos estratos se caracterizan por presentar fragmentos líticos subredondeados y unos datos estructurales de  $N60^{\circ}W/45^{\circ} NE$  y  $N85W/40^{\circ} NE$  respectivamente (figura 48).

Capas 28 y 33: Estratos de arenisca de tamaño medio, ambas capas de tonalidad gris verdoso (5BG 5/2) y un dato estructural de  $N80^{\circ}W/65^{\circ} NE$ . La capa 28 posee un espesor de 1,4 m y la capa 32 de 0,6 m, estos estratos se caracterizan por presentar fragmentos líticos e intercalaciones de carbón (figura 48).



**Figura 48.** Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 21 a la 36. **A)** Afloramiento arenisca capa 22. **B)** Afloramiento arenisca capa 28.

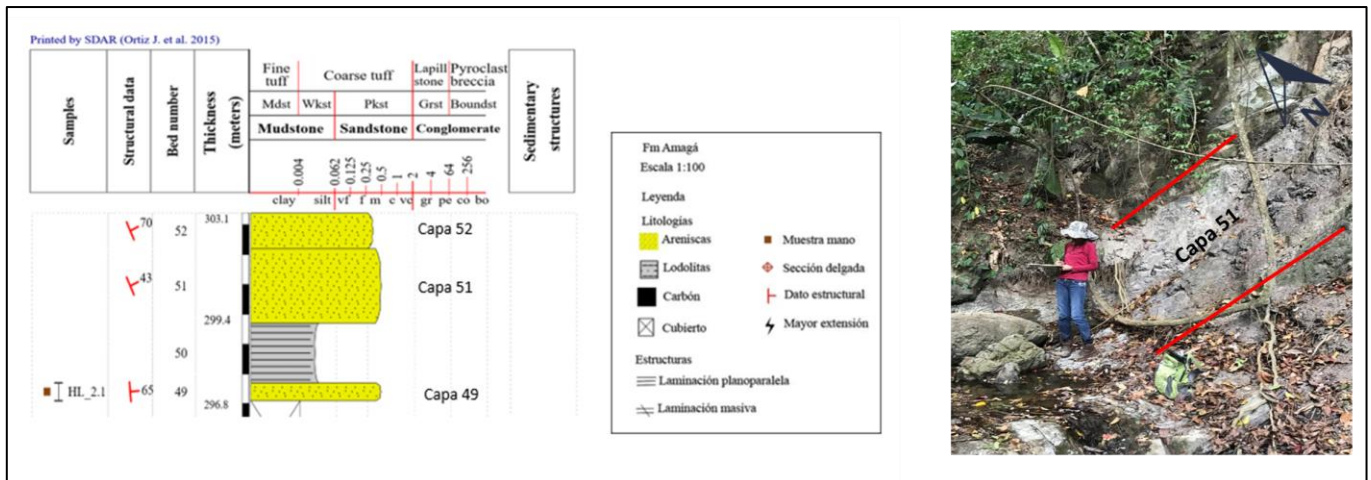
Capas 37 – 39 – 42 – 44 – 46: Estratos de arenisca de tamaños fino a medio, las tres primeras capas (37-38-42) presentan colores grises muy claros (N8) y las capas (43 – 46) color gris amarillento (5Y 8/1). Estos estratos se caracterizan por presentar fragmentos líticos e intercalaciones de láminas de carbón (figura 49).



**Figura 49.** Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 37 a la 47. **A)** Afloramiento arenisca capa 37. **B)** Afloramiento arenisca capa 42.

Capa 49: Estrato de arenisca de tamaño medio a grueso, presenta un color gris amarillento (5Y 7/2) y un espesor de 0,6 m. Esta capa se caracteriza por presentar fragmentos líticos subredondeados y ausencia de intercalaciones de carbón. Presenta un dato estructural de N85W/65° NE (figura 50).

Capas 51 y 52: Estratos de arenisca de tamaño fino a medio, la capa 49 presenta un color gris amarillento (5Y 7/2) y un espesor de 0,6 m; la capa 51 presenta un color gris verdoso (5BG 5/2) y un espesor de 3,70, estas capas se caracterizan por presentar láminas de carbón y fragmentos líticos; presentan un dato estructural N65°W/45°NE y N65°W/70°NE (figura 50).



**Figura 50.** Columna estratigráfica sección Quebrada Aguazul capas de la 49 a la 52 y Afloramiento de la arenisca capa 51.

Teniendo en cuenta la columna estratigráfica y la descripción de las diferentes litologías, de manera general se identificaron las diferentes litofacies y se les asocio un paleoambiente teniendo en cuenta lo planteado por (Miall, 2013):

**Tabla 14.** Código, facies e interpretación de ambientes. Modificado de Corena y Moreno (2019).

Código de las facies	Facies	Estructuras de sedimentarias	Interpretación
<i>Sm</i>	Arena fina a muy gruesa	Masiva	Depósitos de sedimentos de flujos de gravedad
<i>Fl</i>	Areniscas laminadas	Intercalaciones con lodolitas	Depósitos de bancas ríos meándricos
<i>Fl</i>	Areniscas laminadas	Laminación fina	Depósitos de canales abandonados, planicies de inundación
<i>C</i>	Carbón	Plantas	Depósitos de pantanos
<i>Fm</i>	Lodolitas	Estructuras masivas	Llanuras de inundación

Base de la sección (0 – 20,5 m): En esta parte de la sección predominan las areniscas con tamaño de grano de fino a medio (FI) con presencia de laminaciones de carbón (C) y fragmentos líticos, con intercalaciones de lodolitas. Se interpretan como depósitos de bancas de ríos meándricos y depósitos de pantanos.

Parte intermedia de la sección (20,5 m – 163,1 m): En esta parte de la sección se presentan areniscas de tamaño fino a medio con presencia de laminación masiva e intercalaciones de Lodolita (FI), se asocian depósitos de banca de ríos meándricos.

Parte media de la sección (163,1 m – 270,8 m): En esta parte de la sección se presentan estratos de areniscas de tamaño fino a grueso con laminaciones masivas, fragmentos líticos e intercalaciones de lodolitas (FI) y carbón (C), se asocian a depósitos de bancas de ríos meándricos, llanuras de inundación y pantanos.

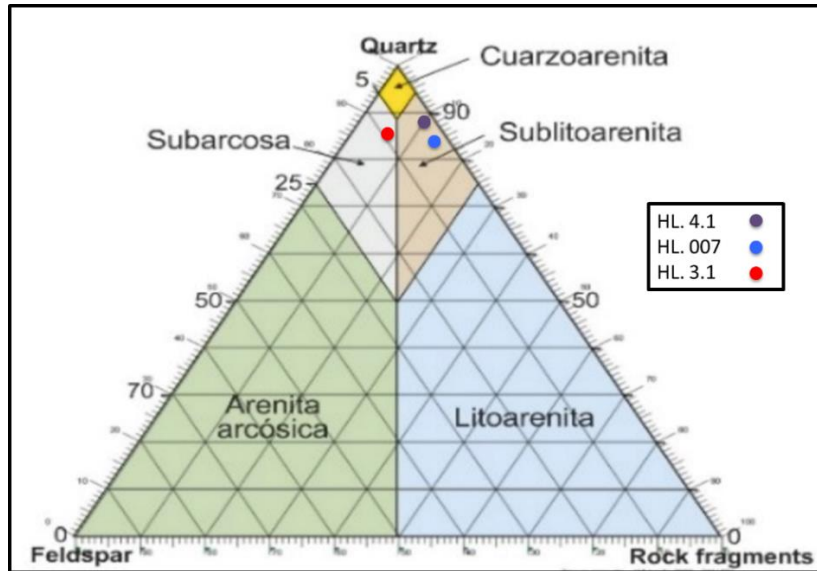
Tope de la sección (270,8 m – 303,1 m): Al igual que en el segmento anterior, se presentan estratos de areniscas de tamaño fino a grueso con laminaciones de carbón, fragmentos líticos e intercalaciones de lodolitas (FI), las cuales se asocian a depósitos de canales abandonados y planicies de inundación.

## 8.2 Descripción petrográfica de las muestras

Para la realización del análisis petrográfica, se utilizaron tres secciones delgadas de areniscas pertenecientes a la Formación Amagá, cada una de las muestras se encuentran localizadas estratigráficamente.

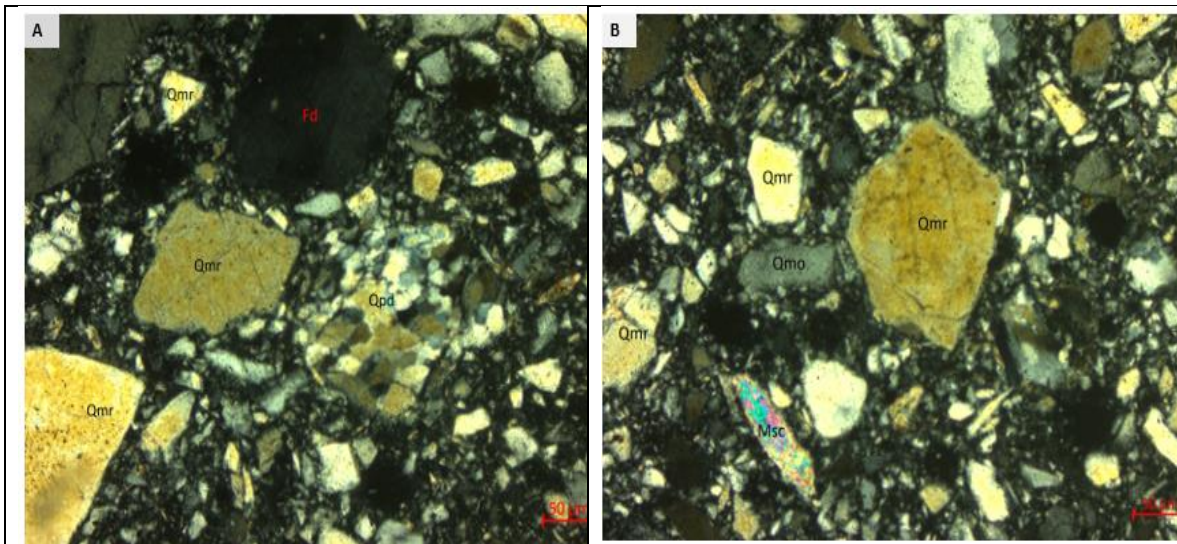
**Tabla 15.** Resultados clasificación composicional.

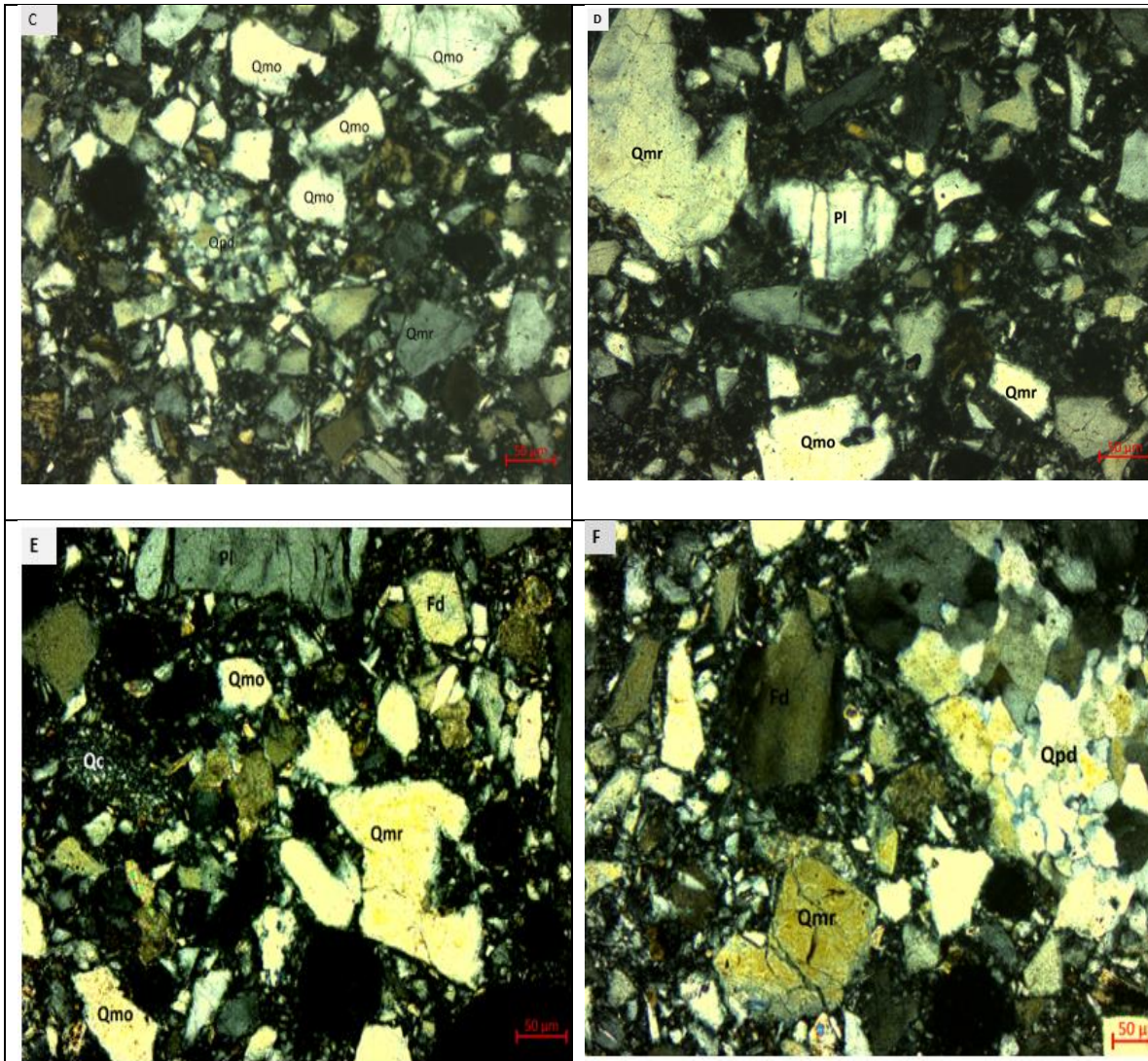
Muestra	localización	Porcentaje Mineralógico			Clasificación composicional
		% cuarzo	F %	% F. Líticos	
HL. 3.1	Vía Horna	84%	7%	9%	Subarcosa
HL. 4.1	Q. Aguazul	88%	10%	2%	Sublitoarenita
HL. 007	Juan Baquero	83%	14%	3%	Sublitoarenita



**Figura 51.** Diagrama ternario de clasificación composicional de areniscas; según Pettijohn et al. (1987).

Las muestras HL.3.1 se clasifica como subarcosa y las muestras HL.007 – HL.4.1 como Sublitoarenita respectivamente (figura 51).





**Figura 52.** Areniscas compuestas, principalmente, por cuarzo monocristalino con extinción ondulatoria (Qmo), cuarzo monocristalino con extinción recta (Qmr), cuarzo policristalino (Qpd), fragmentos líticos cuarzo tipo chert (Qc), feldespatos (Fd) y plagioclasas (Pl). Muestra HL 3.1 recolectada en la sección estratigráfica vía Horna (figura A-B), definida composicionalmente como Subarcosa; Muestra HL 007 recolectada en la sección quebrada Juan Baquero, definida composicionalmente como Sublitoarenita (Figura C-D); Muestra HL 007 recolectada en la sección quebrada Aguazul, definida composicionalmente como Sublitoarenita (Figura E-F).

### **Muestra HL. 3.1**

En esta muestra se presentaron tamaños de granos que varían entre 0,05 hasta 1,15 mm (Figura 52), moderadamente seleccionada, los granos presentan una redondez entre subangular hasta sub-redondeado y una esfericidad clasificada como sub-esfericos (anexo 2).

Se presenta un predominio de cuarzos monocristalinos con 70%, seguido de fragmentos líticos con un 8%, también se observaron feldespatos con un 7%, cuarzos policristalinos con un 6%, moscovitas con 5% y finalmente cuarzo tipo chert y minerales opacos con un 1%.

### **Muestra HL. 4.1**

Se observaron tamaños de grano que varían entre 0,04 hasta 1,2 mm (figura 52), pobremente seleccionada, los granos presentan una redondez predominantemente sub-angular y una esfericidad asociada a formas de grano sub-esfericos.

El tipo de cuarzo predominante es el cuarzo monocristalino con un 72%, seguido del cuarzo policristalino con un 13%, finalmente se encuentran los feldespatos y fragmentos líticos con 7% y 2% respectivamente; en menor proporción moscovitas y opacos.

### **Muestra HL. 007**

En esta muestra se observaron tamaños de grano que varían entre 0,04 hasta 1,4 mm (figura 52), pobremente seleccionada, los granos presentan una redondez de tipo subangular y una esfericidad asociada a granos sub-esféricos.

En la sección delgada predominan: cuarzo policristalino con un 67,6%, seguido del feldespato con un 13%, cuarzo monocristalino con un 11%, fragmentos líticos con 3%, cuarzo tipo chert con 1%, moscovitas con 1%, por último, minerales opacos y otros terrígenos con 1% y 0,9% respectivamente (anexo 2).

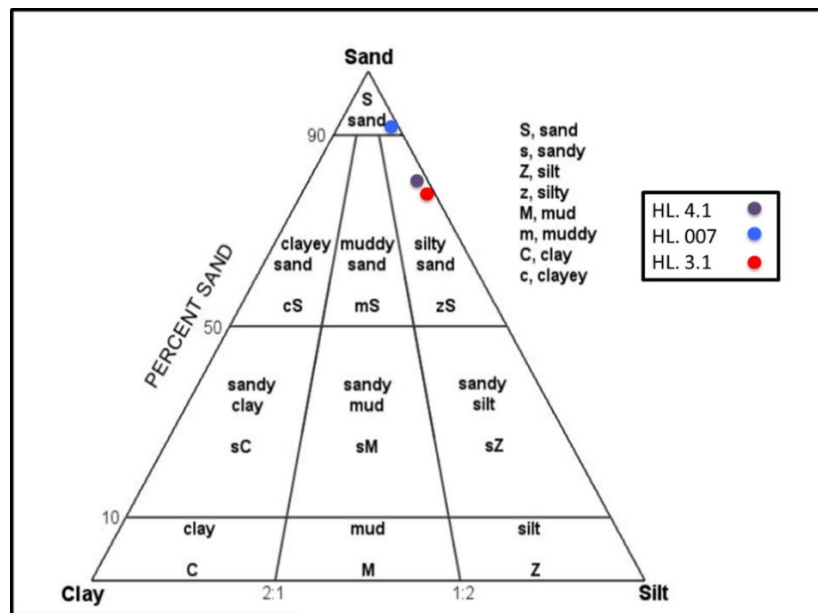
Con base en los diferentes tamaños de grano, se realizó un conteo modal de 300

puntos para la clasificación textural de las muestras, los resultados del conteo se presentan en la tabla 16.

**Tabla 16.** Resultados del conteo de clasificación textural.

Muestra	localización	Porcentaje Mineralógico			Clasificación Textural
		% Arena	%Limo	% Arcilla	
HL. 3.1	Vía Horna	80%	20%	0%	Arenisca Limosa
HL. 4.1	Q. Aguazul	81%	19%	0%	Arenisca Limosa
HL. 007	Juan Baquero	91%	9%	0%	Arenisca

Los valores modales del conteo textural fueron graficados en el diagrama planteado por (Folk, 1954), se evidencia un predominio marcado de minerales tamaño arenisca con valores por encima de un 80% y en menor proporción tamaño limo.



**Figura 53.** Diagrama ternario textural de areniscas; según Folk (1954).

La muestra HL. 007 debido a su alto contenido de tamaños de grano tipo arena superior al 90% se clasificó como arenisca, mientras que las muestras HL. 3.1 y HL. 4.1 se clasificaron como areniscas limosas.

### 8.2.1 Análisis Granulométricos y Químicos

En este ítem se hace una síntesis de los resultados de análisis granulométrico y químico realizados por la empresa RECO minerales S.A.S en años anteriores. El uso de esta información ha sido autorizado por esta empresa.

Para este trabajo se seleccionaron dos muestras representativas ubicadas en la vía Horna las cuales son A053 y A055 (anexo 5).

**Tabla 17.** Análisis granulométrico muestra A053, (Información suministrada por la empresa RECO Minerales S.A.S)

<b>Muestra A053</b>		
<b>Granulometría</b>		
<b>Malla</b>	<b>% Acumulado</b>	<b>% Retiene</b>
100 170	6,68	6,68
170 200	17,82	24,5
200 270	10,51	35,01
270 325	14,32	49,33
325	50,67	100

Con respecto a la tabla 17, las mallas de 270-325 retienen el 49,33 % de la muestra, las mallas 200-270 retienen el 35,01 %, las mallas 170-200 retiene el 24,5%, mientras que la de 100 a 170 solo retiene el 6,6 %.

**Tabla 18.** Análisis químico muestra A053, Información suministrada por la empresa RECO Minerales S.A.S)

<b>Muestra A053</b>	
<b>Análisis Químicos</b>	
<b>Mallas</b>	<b>% Silice SiO<sub>2</sub></b>
170 200 270 325	95,39
< 325	81,48

Teniendo en cuenta la tabla 18 de análisis químicos para la muestra A053, el porcentaje de sílice para las mallas 170-200-270-325 es de 95,39% lo que representa un valor mayor al de la malla de <325 que tiene un porcentaje de SiO<sub>2</sub> de 81,84%.

**Tabla 19.** Análisis granulométrico muestra A055. (Información suministrada por la empresa RECO Minerales S.A.S)

<b>Muestra A055</b>		
<b>Granulometría</b>		
<b>Malla</b>	<b>% Acumulado</b>	<b>% Retiene</b>
100 170	7,11	7,11
170 200	12,9	20,01
200 270	9,76	29,77
270 325	10,54	40,31
325	59,69	100

Con respecto a la tabla 19 muestra A055, la malla 270-325 retiene el 40,31 %, las mallas 200-270 retienen el 29,77%, las mallas 170-200 retienen el 20 %, por último, las malla 100-170 solo se retiene el 7,11 %.

**Tabla 20.** Análisis químico muestra A055. (Información suministrada por la empresa RECO Minerales S.A.S)

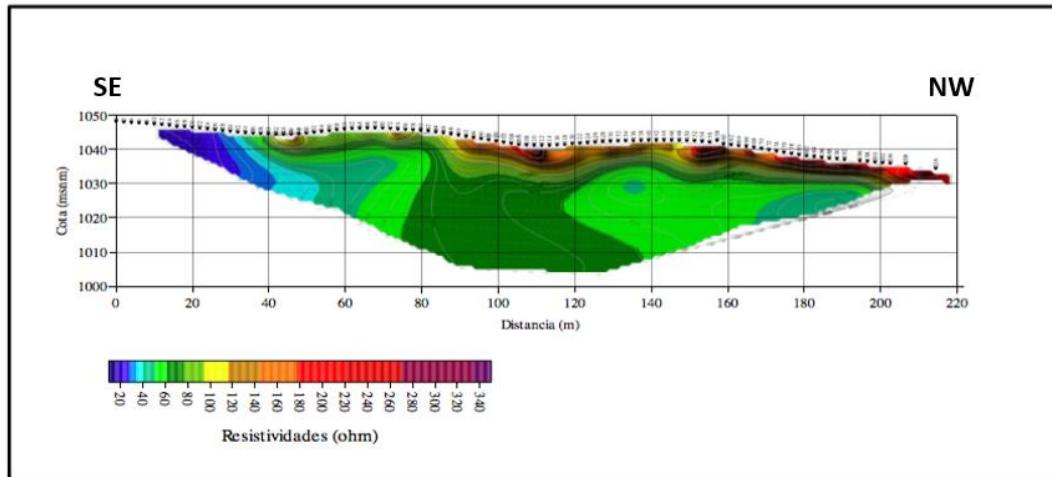
<b>Muestra A055</b>	
<b>Análisis Químicos</b>	
<b>Mallas</b>	<b>% Silice SiO<sub>2</sub></b>
170 200 270 325	85,91
< 325	85,9

Teniendo en cuenta la tabla 20 de análisis químicos para la muestra A055, el porcentaje de sílice para las mallas 170-200-270 y 325 es de 85,91%, igual al de la malla de <325 que tiene un porcentaje de SiO<sub>2</sub> de 85,90%.

### **8.3 Interpretación de tomografías eléctricas**

En la pseudosección (figura 54), se presentaron variaciones de resistividad que van entre 14,1  $\Omega \cdot m$  y valores cercanos a 340  $\Omega \cdot m$ , teniendo en cuenta estas variaciones se definieron 3 grupos diferentes de resistividades: el primer grupo de resistividades van desde aproximadamente 14,1  $\Omega \cdot m$  hasta 40,5  $\Omega \cdot m$  ( zonas de color azul) ubicadas en la parte SE, el segundo grupo de resistividades localizadas en la parte media de la tomografía (zonas de color verde hasta amarillo) presenta variaciones entre 40,5  $\Omega \cdot m$  hasta 94,3  $\Omega \cdot m$ , por último, se presentan en la parte superior

predominantemente las resistividades más altas las cuales varían entre 94,3  $\Omega\cdot m$  hasta valores cercanos a 340  $\Omega\cdot m$ .



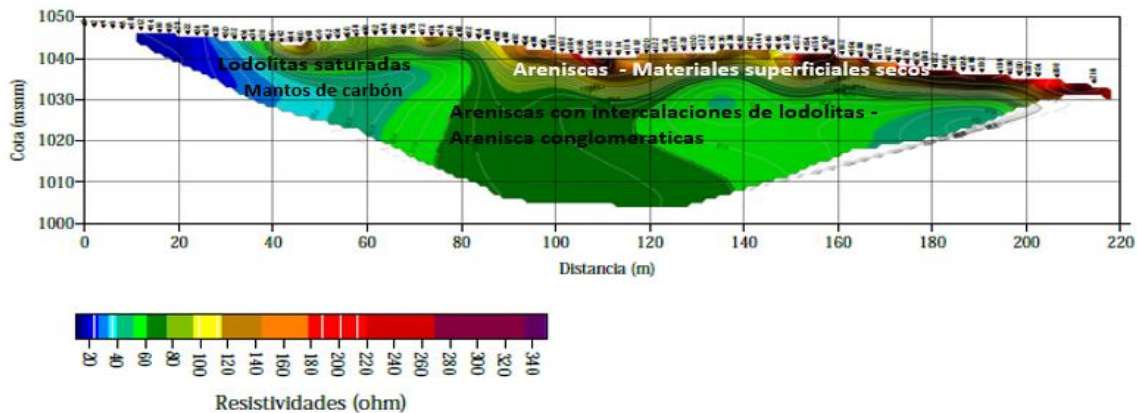
**Figura 54.** Pseudosección de la tomografía de resistividad eléctrica.

**Tabla 21.** Correlación entre valores de resistividad y litologías. Modificado de (Ortega, 2018).

RESISTIVIDAD	CORRELACIÓN LITOLÓGICA
< - 14,123	Lodolitas y limolitas saturadas Mantos de carbón
14,123 - 17,441	
17,441 - 21,541	
21,541 - 26,602	
26,602 - 32,854	
32,854 - 40,575	Areniscas con intercalaciones de lodolitas - Arenisca conglomeráticas
40,575 - 50,110	
50,110 - 61,886	
61,886 - 76,430	Areniscas - Materiales superficiales secos - Rellenos antrópicos
76,430 - 94,391	
94,391 - 116,572	
116,573 - 143,967	
143,967 - 177,799	
177,799 - 219,582	
219,582 - 271,184	
271,184 - > 334,912	

En la tabla 21, los datos de resistividad presentes se asociaron a las diferentes litologías, los rangos de resistividad bajos (14,1  $\Omega\cdot m$  – 40,5  $\Omega\cdot m$ ) se pueden relacionar con lodolitas y estratos de carbón saturados presentes en la parte SE de la sección; los valores de resistividad intermedios (40,5  $\Omega\cdot m$  hasta 94,3  $\Omega\cdot m$ )

dominantes a lo largo de la sección se asociaron a materiales menos saturados tales como areniscas con intercalaciones de lodolitas, esta se encuentra en contacto discontinuo con los materiales presentes en la parte superior, en la cual se presentan los valores más altos de resistividad ( $94,3 \Omega \cdot m - 334,9 \Omega \cdot m$ ) asociados a areniscas poco saturadas, clastos secos y materiales antrópicos (figura 55).



**Figura 55.** Interpretación tomografía de resistividad eléctrica realizada en la zona de estudio.

#### 8.4 Estimación de recursos.

Para el cálculo del volumen de recursos, se utilizó el método de cortes explicado en detalle en el capítulo de la metodología. Con base en la información geológica recolectada en campo y plasmada en las columnas estratigráficas, se realizaron tres cortes ubicados en la parte norte, central y sur del título minero (Figura 56).

Es importante resaltar que el perfil central (B-B'), Quebrada Juan Baquero, al estar limitado por dos perfiles extremos, el valor de la distancia media se calcula tanto para el lado del perfil vía Horna como el perfil quebrada Aguazul siendo este valor la suma de la distancia media de los dos perfiles aledaños.

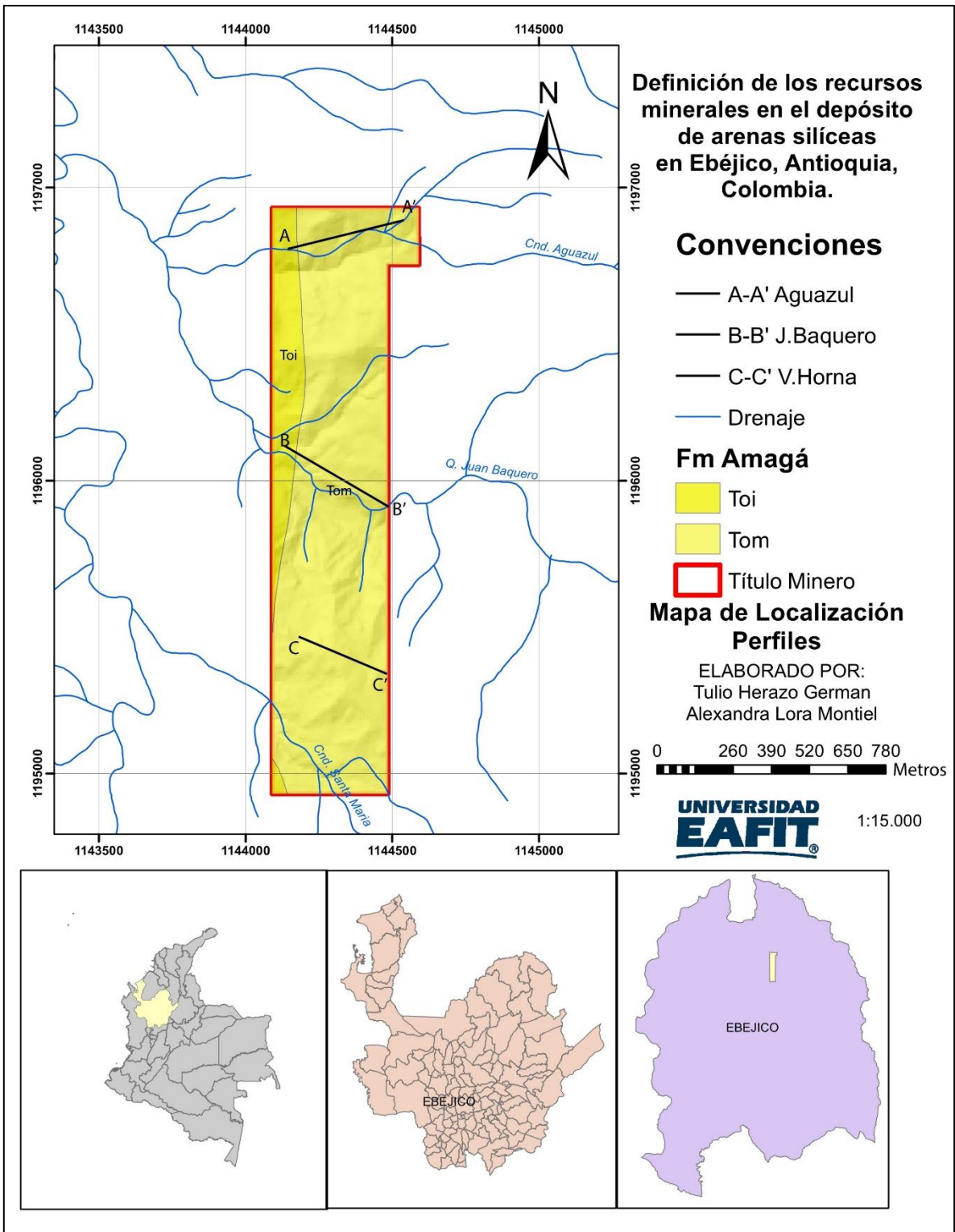
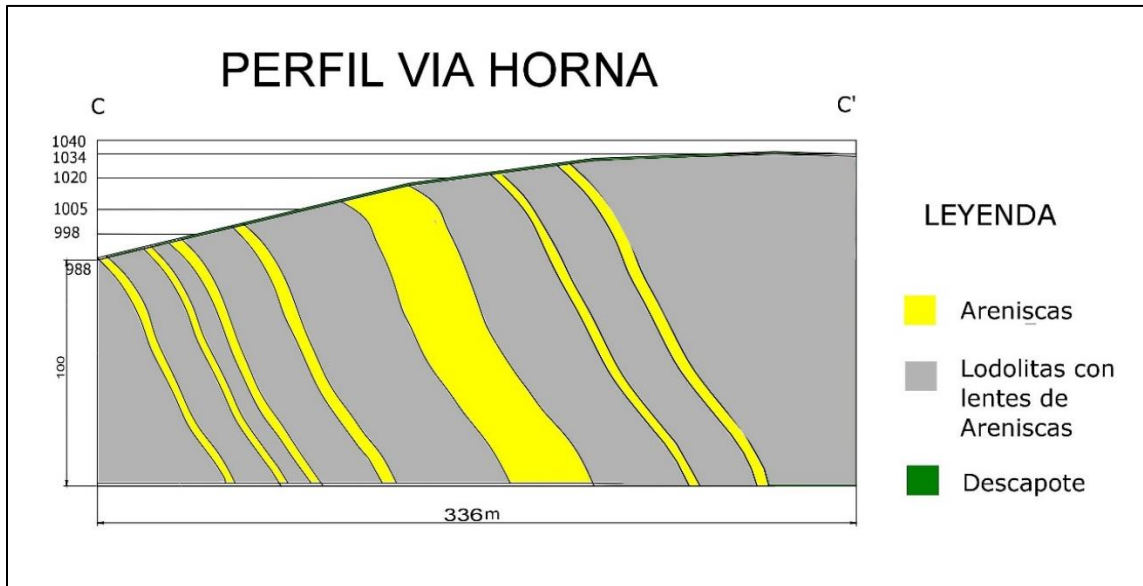


Figura 56. Mapa de localización de perfiles.

### 8.4.1 Perfil Vía Horna

Este perfil se encuentra ubicado en la parte Sur del título minero (figura 56), el volumen de recursos para este perfil (figura 57) es de **685.235 t**.



**Figura 57.** Corte geológico sección Vía Horna. (Ver anexo 7).

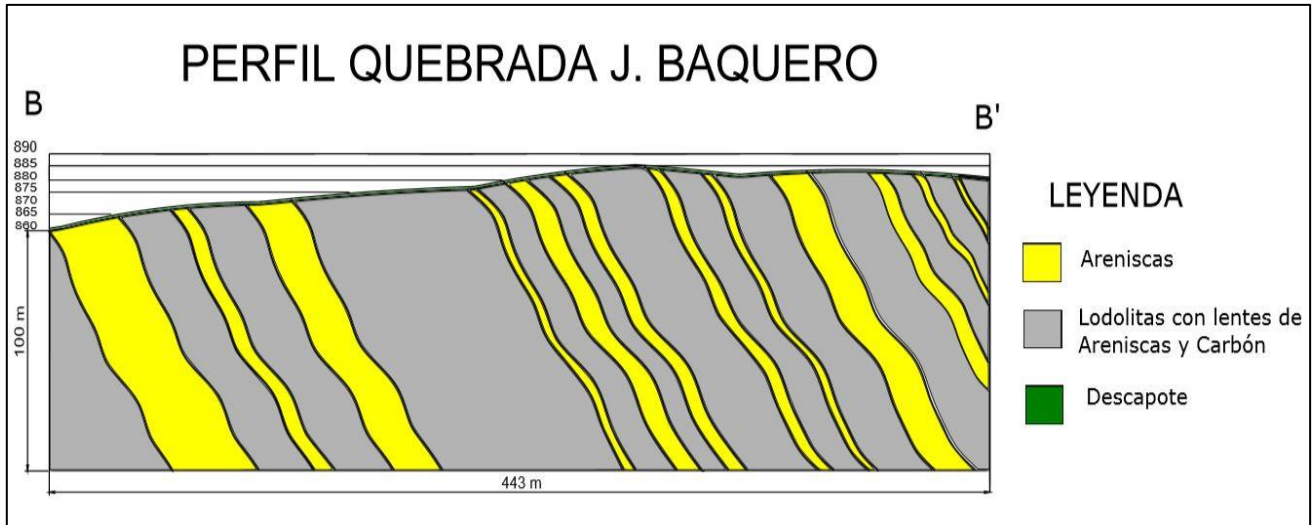
En la tabla 22, se puede observar la distancia media de las capas con el perfil quebrada Juan Baquero y también respectivo volumen en toneladas de los recursos explotables.

**Tabla 22.** Volumen de recursos presentes en la vía Horna

CAPAS	DISTANCIA	AREA ARENA	VOLUMEN MATERIAL	DENSIDAD MATERIAL	RECURSOS TOTALES
#	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>	t
SECCION 1	110	175,5	19.299,5	2,5	48.248,8
SECCION 2	220	125,8	27.682,4	2,5	69.205,9
SECCION 3	220	48,6	10.683,2	2,5	26.708,0
SECCION 4	220	47,1	10.356,1	2,5	25.890,2
SECCION 5	220	743,3	163.534,8	2,5	408.837,0
SECCION 6	220	85,7	18.847,4	2,5	47.118,5
SECCION 7	110	215,4	23.690,7	2,5	59.226,8
TOTAL		1.441,3	274.094,0		685.235,0

### 8.4.2 Perfil Quebrada Juan Baquero

Este perfil se encuentra ubicado en la parte central del título minero (figura 56), el volumen de recursos para este perfil (figura 58) es de **4.300.113 t**.



**Figura 58.** Corte geológico sección quebrada Juan Baquero.

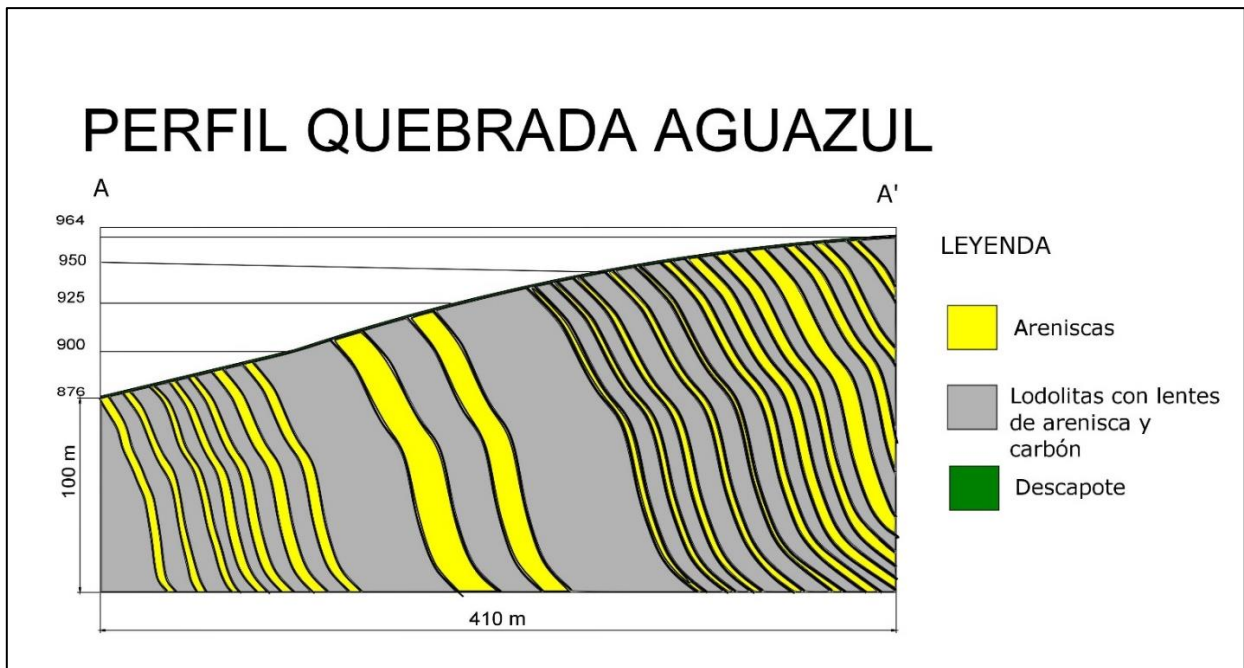
En la tabla 23, se puede observar la suma de la distancia media de las capas con el perfil vía Horna y quebrada Aguazul; también la cantidad de recursos explotables con su respectivo volumen en toneladas.

**Tabla 23.** Volumen de recursos presentes en la quebrada Juan Baquero.

CORTE	DISTANCIA	AREA ARENA	VOLUMEN MATERIAL	DENSIDAD MATERIAL	RECURSOS TOTALES
#	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>	t
SECCION 1	305	953,1	290.691,3	2,5	726.728
SECCION 2	610	156,3	95.358,3	2,5	238.395
SECCION 3	610	703,5	429.153,3	2,5	1.072.883
SECCION 4	610	116,4	71.003,9	2,5	177.509
SECCION 5	610	126,4	77.112,7	2,5	192.781
SECCION 6	610	202,2	123.322,6	2,5	308.306
SECCION 7	610	81,0	49.385,7	2,5	123.464
SECCION 8	610	73,3	44.700,7	2,5	111.751
SECCION 9	610	629,1	383.775,4	2,5	959.438
SECCION 10	610	224,5	136.966,8	2,5	342.417
SECCION 11	610	23,9	14.579,0	2,5	36.447
SECCION 12	305	13,1	3.995,5	2,5	9.988
TOTAL		3.302,8	1.720.045,2		4.300.113

### 8.4.3 Perfil Quebrada Aguazul

Este perfil se encuentra ubicado en la parte Norte del título minero (figura 56), el volumen de recursos para este perfil (figura 59) fue de **3.907.987 t.**



**Figura 59** . Corte geológico sección quebrada Aguazul.

En la tabla 24, se puede observar la distancia media de las capas con el perfil quebrada Juan Baquero y el respectivo volumen en toneladas de los recursos explotables.

**Tabla 24.** Volumen de recursos presentes en la quebrada Aguazul.

CORTE	DISTANCIA	AREA ARENA	VOLUMEN MATERIAL	DENSIDAD MATERIAL	RECURSOS TOTALES
#	m	m2	m3	t/m3	t
SECCION 1	195	112,1	21.859,5	2,5	54.648,8
SECCION 2	390	127,9	49.881,0	2,5	124.702,5
SECCION 3	390	152,5	59.477,9	2,5	148.694,7
SECCION 4	390	160,5	62.600,7	2,5	156.501,8
SECCION 5	390	171,3	66.807,0	2,5	167.017,5
SECCION 6	390	190,6	74.317,0	2,5	185.792,5
SECCION 7	390	210,2	81.984,0	2,5	204.959,9
SECCION 8	390	263,3	102.687,0	2,5	256.717,5
SECCION 9	390	292,8	114.184,2	2,5	285.460,5
SECCION 10	390	171,9	67.041,0	2,5	167.602,5
SECCION 11	390	184,3	71.892,5	2,5	179.731,2
SECCION 12	390	192,0	74.862,5	2,5	187.156,1
SECCION 13	390	196,6	76.654,5	2,5	191.636,3
SECCION 14	390	204,0	79.543,2	2,5	198.857,9
SECCION 15	390	206,9	80.691,0	2,5	201.727,5
SECCION 16	390	208,2	81.196,4	2,5	202.991,0
SECCION 17	390	216,9	84.591,0	2,5	211.477,5
SECCION 18	390	267,1	104.180,7	2,5	260.451,8
SECCION 19	390	213,8	83.383,8	2,5	208.459,5
SECCION 20	390	213,4	83.213,5	2,5	208.033,8
SECCION 21	195	216,1	42.146,5	2,5	105.366,3
TOTAL		4.172,3	1.563.194,8		3.907.987,1

Finalmente, en el volumen total entre los tres perfiles realizados es de **8.893.335** se observan la cantidad total de recursos en toneladas presentes en el título minero, la relación de descapote de todo el título es de 1 m.

## **9. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Con base en los diferentes resultados obtenidos en el capítulo anterior siendo estos: petrografía de secciones delgadas, análisis granulométrico - químico, tomografías eléctricas de resistividad, columnas estratigráficas y estimación de los recursos, se realizaron los siguientes análisis:

### **9.1 Petrografía, granulometría y análisis químico.**

A manera general, las propiedades composicionales más específicamente el contenido de sílice presente en las areniscas es el principal factor diferenciador que permite clasificar estos materiales como de uso industrial en diferentes sectores.

Las areniscas analizadas en el área de estudio presentan diferentes minerales constituyentes evidenciando en menor proporción feldespatos y fragmentos líticos, y en mayor proporción cuarzo con valores que varían entre un 83% hasta 88%, no obstante, estos valores composicionales alcanzados fueron obtenidos en material crudo, es decir, sin realizar ningún lavado de las muestras y sin incluir los porcentajes de sílice presente en minerales como los feldespatos y las micas, por lo cual es un buen indicio del porcentaje aproximado de sílice que contienen las areniscas de la zona de estudio.

Por otra parte, los resultados de los conteos obtenidos son muy coherentes teniendo en cuenta el análisis químico realizado para las mallas 170-200-270-325 y las mallas <325 de las muestras A-053 y A-055. Estos valores se muestran en la tabla 25.

**Tabla 25.** Porcentaje de sílice obtenido para las muestras A-053 y A-055. (Información suministrada por la empresa RECO Minerales S.A.S)

<b>Análisis Químicos</b>		
<b>Mallas</b>	<b>% Sílice SiO<sub>2</sub></b>	
	<b>A-053</b>	<b>A-055</b>
170-200-270-325	95,39	85,91
< 325	81,48	85,9

Teniendo en cuenta que en la región existe una gran variedad de empresas consumidoras de arenas silíceas tales como: Pintuco, Sika, fundiciones Espitia, Andercol, Erecos, Bronco, Sumiglas S.A., Fymecol S.A, Pinturas Tito pavón, Imusa, Sumiglas y Sumicol; estas areniscas, con base en sus diferentes características pueden ser implementadas en gran variedad de usos, realizándoles un tratamiento adecuado. Por lo tanto, con base en las características granulométricas requeridas en la industria (tabla 10 y 11) y los valores de análisis granulométricos alcanzados (Tabla 17 y 19), es posible utilizar la arena silícea del área de trabajo en sectores de la industria tales como microcemento, placas corona, fundición, pegantes, entre otros.

## **9.2 Tomografías eléctricas de resistividad**

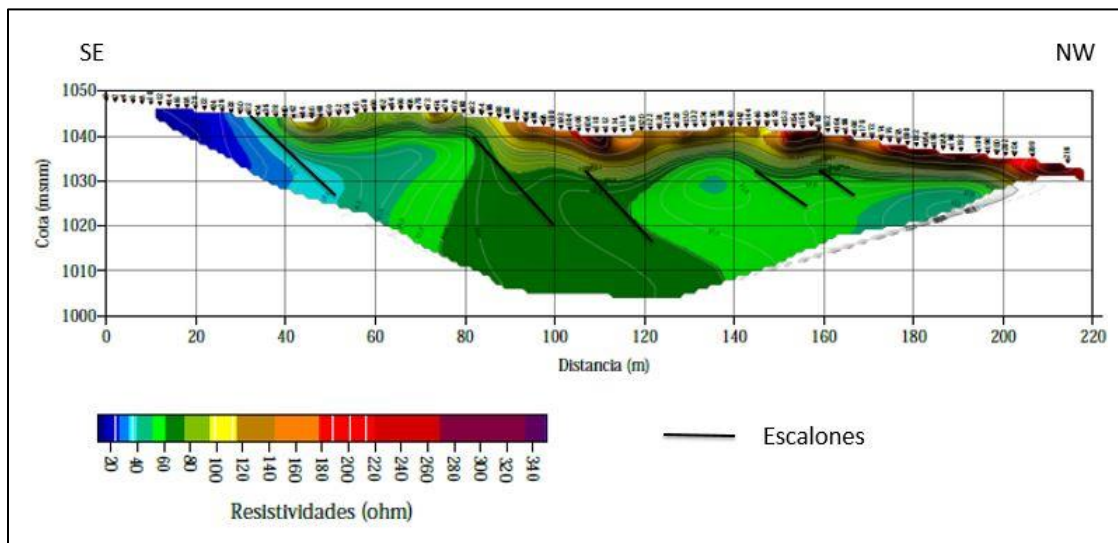
A partir de las resistividades eléctricas obtenidas de la tomografía compuesta, fue posible caracterizar las litologías presentes pertenecientes a la formación Amagá (tabla 21).

Se agruparon las resistividades en tres grupos: el primer grupo con valores de resistividad más altos se localizan en la parte superior de la tomografía preferencialmente hacia la parte NW, presentando variaciones entre 94,3  $\Omega \cdot m$  hasta 340  $\Omega \cdot m$ , estos valores de resistividad se asociaron con areniscas poco saturadas,

materiales superficiales secos y rellenos antrópicos, el espesor de esta parte de la sección es de aproximadamente de 10 m.

El segundo grupo de resistividades presenta valores intermedios, variando entre 40,5  $\Omega\cdot\text{m}$  y 94,3  $\Omega\cdot\text{m}$ ; estos valores de resistividad se asociaron a areniscas de diferente tamaño de grano con intercalaciones de lodolitas. Es importante resaltar que estas resistividades predominan a lo largo de la tomografía con un espesor de aproximadamente de 35 m siendo esta zona de gran interés para un futuro aprovechamiento del recurso.

En la parte SE de la tomografía, se presentaron los valores más bajos de resistividades, los cuales varían entre 14,1  $\Omega\cdot\text{m}$  hasta 40,5  $\Omega\cdot\text{m}$  asociados a litologías tales como lodolitas saturadas y mantos de carbón. Estos valores bajos de resistividad se encuentran cercanos a la superficie con un espesor de aproximadamente 15 m, sin embargo, se debe tener en cuenta el grado de saturación ya que esto puede bajar los valores de resistividad de los materiales fino-granulares presentes.



**Figura 60.** Tomografía interpretada con posible evidencia de escalones.

Teniendo en cuenta la figura 60, se evidencia la presencia de escalones los cuales estarían concordantes con los valores de buzamiento de las capas tomados en campo que tendrían en la sección un buzamiento aparente.

### **9.3 Columnas Estratigráficas**

A partir de las columnas estratigráficas fue posible identificar diferentes características las cuales se describen e interpretan a continuación.

#### **9.3.1 Sección vía Horna:**

En esta sección se lograron identificar 8 estratos de areniscas los cuales presentan variaciones de espesor entre 0,35 m hasta 5 m, los estratos de areniscas se encuentran repartidos a lo largo de la sección. Cabe resaltar, que en la parte central de la columna estratigráfica (figura 25) se presenta una capa con espesor de aproximadamente 5 m, siendo esta de gran interés para un posible aprovechamiento económico. El espesor acumulado de estratos de areniscas es de 10,75 m de espesor representando el menor espesor de areniscas en comparación con las otras dos secciones.

#### **9.3.2 Sección Quebrada Juan Baquero:**

En esta sección se lograron identificar 30 estratos de areniscas los cuales presentan variaciones de espesor entre 0,4 m y 7 m, estas capas se encuentran repartidas tanto en la base como en el tope de la sección. Es de resaltar que en esta sección se presentan las capas con mayor espesor del título minero lográndose evidenciar 6 capas con espesores superiores a 5 m, siendo estas las capas 1,13,23,43,50 y 69 de la columna estratigráfica (Figura 30).

El espesor acumulado de estratos de areniscas es de 73,7 m presentado el mayor espesor de capas de arena, sin embargo, una parte la de la sección se encuentra localizada por fuera del título minero. Cabe resaltar, que hacia el tope de la sección es donde más afloran estratos de carbón evidenciando una posible variación de ambientes.

### 9.3.3 Sección Quebrada Aguazul:

En esta sección se lograron identificar 21 estratos de areniscas los cuales presentan variaciones de espesor entre 0,4 m y 3,5 m, estas capas se encuentran repartidas a lo largo de la sección presentándose mayor cantidad de capas en la base y hacia el tope de la sección.

En esta sección los espesores de las capas son menores en comparación con las anteriores secciones, solamente dos capas presentan espesores superiores a 3 m correspondiendo a las capas 4 y 18 de la columna estratigráfica (Figura 42), sin embargo, el espesor acumulado de las capas de areniscas es de 30,9 m siendo esta columna en cuanto a espesores la segunda de mayor espesor. Los estratos de carbón presentes en esta columna afloran en mayor cantidad hacia el tope de esta, lo cual evidencia una variación en los ambientes de depositación, similar a lo evidenciado en la quebrada Juan Baquero.

De manera general en todas las columnas analizadas, se lograron identificar 5 estratos diferentes de areniscas, los cuales se presentan y se repiten en cada una de las secciones estudiadas, siendo estas:

- Areniscas con presencia de láminas de carbón.
- Areniscas con presencia de láminas de carbón y fragmentos líticos.
- Areniscas con presencia de fragmentos líticos sin láminas de carbón.
- Areniscas con tamaño de grano fino.
- Areniscas con tamaño de grano medio a grueso sin fragmentos líticos y láminas de carbón.

Por otra parte, a partir de las diferentes estaciones realizadas se logró constatar la posible continuidad de los estratos de areniscas a lo largo del título minero (anexo 1). Teniendo en cuenta las diferentes facies identificadas se evidenció el predominio de ambientes fluviales presentando variaciones entre ríos meándricos y trenzados con variaciones a depósitos de pantanos.

#### **9.4 Estimación del recurso**

Conocer la cantidad de recursos presentes en un depósito mineral es muy importante ya que permite tener una visión de las dimensiones de material, la disposición de este y las zonas que son más factibles para llevar a cabo un aprovechamiento del recurso. Para definir la viabilidad de un proyecto minera se deben tener en cuenta otros factores que permitan conocer la rentabilidad de este, con el propósito de verificar si es beneficioso realizar la explotación del recurso.

Para la estimación de los recursos del área de estudio, se implementó el método de los perfiles, método que se utilizó producto de la continuidad de las capas evidenciadas en campo. Este se realizó con base en las columnas estratigráficas levantadas en campo, a partir de las cuales se realizaron tres perfiles.

La zona central del área de estudio con un volumen de recursos de **4.300.113 t** es la que presenta mayor potencial para llevar a cabo un aprovechamiento económico del recurso; seguido de la zona norte con un volumen de **3.907.987 t** y finalmente la parte Sur del depósito con un volumen de **685.235 t**. Es importante resaltar que existen zonas en las cuales no fue posible cuantificar el recurso ya que las capas no afloran en superficie.

Finalmente, se determinó el volumen total de recursos para las secciones analizadas obteniendo un valor de **8.893.335 t**.

## 10. CONCLUSIONES

- La Hipótesis planteada para el proyecto se cumple ya que las características mineralógicas, granulométricas y químicas, evidenciadas en las areniscas corresponden a las especificaciones de arenas silíceas requeridas por el mercado. Además, los recursos estimados son suficientes para considerar el inicio de una operación de extracción y beneficio de este mineral. De todas maneras, se recomienda realizar estudios de mayor detalle que permitan conocer de manera más precisa la calidad de las arenas silíceas y los Recursos Minerales y Reservas Minerales del depósito.
- Con base en la superposición de tomografías eléctricas de resistividad, se logró caracterizar las diferentes litologías que afloran a profundidad en el área de estudio, identificando una zona en la parte central de la tomografía en la cual los valores de resistividad se asociaron a areniscas con intercalaciones de lodolitas presentando un espesor de aproximadamente 35 m, siendo esta parte de gran interés económico.
- La petrografía de las areniscas analizadas permitió identificar diferentes propiedades tales como: tamaño, redondez, esfericidad y composición, siendo esta última fundamental para determinar el porcentaje mineralógico, dejando en evidencia la presencia de cuarzo en gran proporción con valores superiores a un 80% sobre material de arena silícea sin procesar
- Los valores de granulometría suministrados permiten asociarle unos posibles usos en la industria tales como: microcemento, placas corona, fundición, pegantes, entre otros.
- A partir de las columnas estratigráficas levantadas en el área de estudio, se pudieron identificar 5 estratos diferentes de areniscas que varían conforme a la presencia de carbón, fragmentos líticos y el tamaño de grano.

- Con base en las diferentes litologías que afloran en las secciones estratigráficas, se evidenció el predominio de ambientes fluviales presentando variaciones entre ríos meándricos y trezados con variaciones a depósitos de pantanos.
- La estimación de los Recursos de areniscas en el título minero ubicado en Ebéjico se realizó a partir del método de cortes o perfiles geológicos dando como resultado un volumen de **8.893.335 toneladas**

## **11. RECOMENDACIONES**

- Realizar un muestreo granulométrico y de secciones delgadas con cada una de las capas presentes en el título, que permita obtener información más detallada de la calidad de las areniscas para así clasificarlas con base en los diferentes parámetros requeridos en la industria.
- Hacer cartografía geológica detallada en la zona de estudio y sus alrededores, con el objetivo de conocer con mayor detalle el comportamiento estructural de los niveles de areniscas.
- Se recomienda realizar un mapa geológico del título minero que permita conocer de manera más acertada la distribución y proyección de las capas a lo largo de éste.
- Realizar sondeos eléctricos verticales y perforaciones que permitan integrar mayor cantidad y calidad de información, con el fin de obtener un modelo de recursos más acertado.
- Realizar un programa de trincheras y un plan de perforación para determinar la categoría de los recursos Minerales.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

Agencia Nacional de Minería, 2001. Código de Minas Ley 685 de 2001. Bogotá, Colombia: Diario Oficial, 45273.

Álvarez Ramírez, D., 2016. Sectorización de arenas silíceas por bloques para el avance de los frentes de explotación: Título minero 2406-Compañía PELDAR.

Álvarez, J. González, H., 1978. Geología y geoquímica del cuadrángulo I-7 Urrao. Ingeominas, Informe 1761. 347 p.

Beckwith, R., 2011. Proppants—Where in the world: Journal of Petroleum Technology, April 2011, p. 36–41.

Benson, M. E., Wilson, A. B., Bleiwas, D. I., 2015. Frac sand in the United States: A geological and industry overview (No. 2015-1107). US Geological Survey.

Botero, A., 1963. Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. Facultad de Minas (Medellín) 57, 101.

Botero, G., Toussaint, J., Ospina, H., Ortiz, F., Gómez, J., 1974. Yacimiento fosilífero de Arma. Anales Facultad de Minas, Vol 58, 1-12p.

Bustamante, J., 2009. Estandarización y optimización del proceso de clasificación de arena en la planta de caolín de la empresa Sumicol S.A, ubicada en el municipio de la unión, departamento de Antioquia, Colombia. Tesis de pregrado, universidad Nacional de Colombia.

Bustillo Revuelta, M.A., 1989. Las rocas silíceas como materia prima en la industria actual. Boletín geológico y minero 100(6), 170-179.

Bustillo, M., López, C., 1997. Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras. Madrid: Entorno Grafico, S.L.

Comisión Colombiana de recursos y reservas minerales (CCRR), 2018. Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, Recursos y reservas minerales –ECRR-.

Contento Franco, J. A., Pinto Cervantes, I. D., 2015. Diseño del método de explotación del yacimiento de caliza módulo norte de la mina La Esperanza, municipio de La Calera-Cundinamarca. Tesis de pregrado, Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia facultad seccional Sogamoso.

Corena C, Moreno E., 2019. Reconstrucción Paleoambiental de las formaciones Amagá y Combia en la sección quebrada la Táparo, Suroccidente Antioqueño. Tesis de pregrado, Universidad EAFIT.

Costafreda Mustelier, J. L., Leyva Rodríguez, C., Parra y Alfaro, J. L., Calvo Pérez, B., 2012. Los Yacimientos Ecuatoguineanos de Arenas Silíceas. Caracterización y Establecimiento de sus Posibles Usos. III Congreso Nacional De Áridos. X Jornadas Iberoamericanas De Materiales De Construcción. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Cáceres, España.

Cubides, C., 2014. Diseño del método de explotación para la licencia 14816 en el municipio de Melgar departamento del Tolima. Tesis de Pregrado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia seccional Sogamoso escuela ingeniería de minas.

Donza, H., Cabrera, O., Irassar, E., 2002. High-strength concrete with different fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, 32(11), 1755-1761p.

Feininger, T., Castro, N., 1965. Geology of the region between buritica and Santa Fe de Antioquia with special reference to the economic geology of body of andesite. *Inventario Minero Nacional. Informe interno*, Medellín.

Folk, R., 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rocks. *Journal of Geology*, 62(4), 344-359.

Galvis, L., franco, A., 2013. estratigrafía secuencial y análisis integrado de procedencia de las sedimentitas de la formación Amagá en la sub-cuenca santa fe de Antioquia. Tesis de Pregrado, Universidad de Caldas.

Geonica., 2017. Tomografía eléctrica multielectrodo. Universidad de Coruña, 1-6 p.

Gómez, D., Lozada, J., 2008. Construcción de una cabina para limpieza superficial de probetas de soldadura mediante chorro de arena (sand-blasting). Proyecto de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Gonzáles, H., 2001. Memoria Explicativa del Mapa Geológico del Departamento de Antioquia, escala 1: 400.000. Bogotá D.C., 241 p.

González, H., 1980. Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 168 (Salamina): *Boletín Geológico*, Vol. 23, 174 P.

Grosse, E., 1926. Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la cordillera central de Colombia.

Guzmán, C., 1991. Condiciones de depositación de la Formación Amagá entre Amagá y Angelópolis. Tesis de Postgrado, Universidad Nacional de Medellín, 197 p.

Guzmán, C., Sierra, G., 1984. Ambientes sedimentarios en la Formación Amagá. Proyecto de grado, Universidad Nacional Medellín, 303 p.

Henao Betancur, J. E., 2012. Estratigrafía y petrografía de las areniscas de la secuencia quebrada La Naranjala–Municipio de Fredonia miembro inferior de la formación Amagá. Tesis de pregrado, Universidad EAFIT.

Hernández, I., 1998. Petrografía de las areniscas de la sección Peñitas-Mina Excarbón. Miembro medio de la Formación Amagá. Titiribí, Antioquia. Proyecto de grado U. EAFIT. Medellín, 90 p.

Indusilika, S.A.S., 2017. Características físicas, granulométricas y químicas para las arenas empleadas en la industria de la fundición. Ficha técnica.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), 2012. Atlas de la distribución de las vías rurales en Colombia. Bogotá, Universidad de los Andes.

Lara, M., Salazar-Franco, A. M., Silva, J. C., 2018. Provenance of the Cenozoic siliciclastic intramontane Amagá Formation: Implications for the early Miocene collision between Central and South America. *Sedimentary Geology*, 373, 147-162.

Lepin, O., Arisosa, J., 1968. Búsqueda, exploración y evaluación geológico-económica, La Habana: Pueblo educación y ciudad.

Lozano, E., Zamora, N., 2014. Compilación de la cuenca de Amagá-Cauca-Patía. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá D.C. 30p.

Mansour, M., 2015. Develop a strategic forecast of silica sand based on supply chain decomposition. *International Journal of Engineering*, 9(1), 9-27p.

Maya Sánchez, M., 2006. Zonas potenciales para agregados naturales en los alrededores de Medellín, Colombia. *Boletín geológico y minero* 117(4), 703-714.

Mejía, M., 1984. Geología y Geoquímica de las planchas 130 (santa fe de Antioquia) 146 Medellín occidental. Ingeominas. Medellín, 364p.

Miall, A. D., 2013. *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Springer.

Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva, J.C., Valencia, V., Ayala, C., Pérez- Angel, L.C., Rodríguez-Parra, L.A., Ramírez, V., Niño, H., 2015. Middle Miocene closure of the Central American Seaway. *Science* 348, 226–229.

Murillo, S., 1998. Petrografía de las areniscas de la secuencia Quebrada la Sucia-Mina Palomos. Miembro Inferior de la Formación Amagá. Proyecto de Grado, U. EAFIT, Medellín, 150 p.

Ortega, C., 2018. Caracterización Geoeléctrica de zonas de explotación de carbón en un sector del municipio de Angelópolis (Antioquia). Tesis de pregrado, Universidad EAFIT.

Ortiz, J., Moreno, C., Cárdenas, A, Jaramillo, C., 2015. SDAR 1.0 a new quantitative toolkit for analyze stratigraphic data. *Geophys. Res.*

Palacios, J., Presiga, R., 2014. Incidencia de los procesos de certificación de fincas cafeteras, en el municipio de Ebéjico occidente de Antioquia, como estrategia comercial para cafés diferenciados. Proyecto de Grado, Universidad Nacional Sede Medellín.

Pérez Hernández, K., 2019. Estudio geofísico para la prospección de fuentes alternativas de agua libre de arsénico en el área de cerrito blanco, Matehuala. Tesis de Postgrado, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, a. c.

Pettijohn, F. J., Potter, P. E., Siever, R, 1987. *Sand and Sandstone*, 2nd ed. New York: Springer, 553 pp.

Piedrahita, V. A., Bernet, M., Chadima, M., Sierra, G. M., Marín-Cerón, M. I., Toro, G. E., 2017. Detrital zircon fission-track thermochronology and magnetic fabric of the Amagá Formation (Colombia): Intracontinental deformation and exhumation events in the northwestern Andes. *Sedimentary Geology*, 356, 26-42.

Pons, D., 1984. La flore du bassin houiller d'Antioquia (Tertiaire de Colombie). 109 congres National des Sociétés Savantes, Fase II, pp. 37–56.

Preciado Gómez, D. L., Lozada Cerna, J. A., 2008. Construcción de una cabina para limpieza superficial de probetas de soldadura mediante chorro de arena. Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Quijano, J. E., 2014. Parámetros morfométricos, geomorfológicos y correlación estructural en cinco cuencas hidrográficas de la Cuenca Amagá. Tesis de pregrado, Universidad Eafit.

Quintero Martínez, Y., 2014. Caracterización fisicoquímica de cuarzo en el municipio de la playa de belén (norte de Santander). Tesis de pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Ramírez, E., Trujillo, A., Plata, A., Vallejo, F., Trejos, R., 2015. Edad y ambiente de la Formación Amagá (Sector de Santa Fé de Antioquia-Sopetrán) con base en evidencias palinológicas. XV Congreso Colombiano de geología. Bucaramanga, Colombia, p. 277.

Restrepo, J. J., Toussaint, J. F., 1976. Edades radiométricas de algunas rocas de Antioquia, Colombia. Publicaciones Especiales Geología Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

Rincón, J. M., 2005. Materias primas para la industria del vidrio. Trabajo de investigación de materiales vítreos y cerámicos, Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja.

Rojo García, C., 2008. Planta de lavado para arena silícea. Tesis de Pregrado, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Civil.

Salamanca G, H., 2000. Esquema de ordenamiento territorial, Alcaldía de Ebéjico.

Secretaría de Economía, 2013. Perfil de mercado del sílice. Coordinación general de minería. Dirección general de desarrollo Minero, México.

Serrano O, J., 2003. Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo, Tema 3 tomografía de resistividad eléctrica. Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Catalunya.

Servicio Geológico Británico (B.G.S), 2009. Mineral planning fact sheet, silica, national environment research council.

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.

Sierra, G.M., Marín-Cerón, M.I., 2011. Amagá, Cauca and Patía Basins. In: Cediell, F. (Ed.), Petroleum Geology of Colombia, 2, Fondo Editorial Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

Silva, J., Sierra, G. M., Correa, L. G., 2008. Tectonic and climate driven fluctuations in the stratigraphic base level of a Cenozoic continental coal basin, northwestern Andes. Journal of South American Earth Sciences, 26(4), 369-382.

Sundararajan, M., Raghavan, P., Ramaswamy, S., 2009. Evaluation for the beneficiability of white silica sands from the overburden of lignite mine situated in Rajparadi district of Gujarat. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 8(9), 701-713.

Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), 2018. Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia al año 2035. Bogotá D.C., 1-46p.

Van Der Hammen, T., 1958. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano y Tectogénesis de los Andes Colombianos. Bol. Geol. Bogotá. 1-15p.

Varas, M. J., Molina, E., Vicente, M. A., 2002. Areniscas ornamentales empeladas en Ciudad Rodrigo, Salamanca: caracterización petrográfica y química de los materiales de cantera. Revistas materiales de construcción, 52(266), 33-53.

Vásquez Márquez, M. Á., Ramos Zamora, C. M., 2018. Cálculo de reservas para la explotación de la cantera de arena Cachachi, provincia Cajabamba, Cajamarca. Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte.

Vásquez., J., 2016. Plan Desarrollo municipal. Ebéjico, Antioquia.

Zdunczyk, M., 2007. The facts of frac. *Industrial Minerals Journal*. 1, 58–61p.

Zdunczyk, M., 2014. Hydraulic fracturing sand (frac sand). *Mining Engineering*.66(7),53–55p.