

Caracterización sedimentológica de la Formación Bucaramanga en el relleno sanitario

El Carrasco

Juan Carlos Gutiérrez Barrera, Daniela Pico Barajas

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director

Francisco Alberto Velandia Patiño

PhD Geólogo

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2020

## Dedicatoria

*A mis padres, por su constante cariño, esfuerzo y dedicación, supieron llenar mi mente y mi corazón de valiosas enseñanzas para la vida.*

*A mi madre, incansable y valerosa mujer que me ha acompañado en este gratificante recorrido, desvelándose conmigo y despertando antes del alba, entregada a cumplir con amor y responsabilidad su compromiso de sostener el hogar.*

*A mi familia, por su compañía, consejos y apoyo sincero.*

*A Andrea, por su importante apoyo y comprensión a lo largo de este ciclo personal, siempre conservarás un espacio en mi corazón.*

*A mi Abuela, que siempre estuvo acompañándome en cada una de mis aventuras, participando activamente en todas las etapas de mi vida y aportando de gran manera a mi formación integral. Ahora desde el cielo te regocijas con este logro, que es todo tuyo; continuarás guiando mis pasos y rogando al altísimo para que mi camino se mantenga siempre en el sendero justo. Hoy puedes estar orgullosa de ver el fruto de tu amor convertido en un hombre capaz de afrontar cada obstáculo con la valentía y determinación que tú le inculcaste. Tengo la certeza que espiritualmente estarás a mi lado en cada momento.*

*Gracias por tanto.*

Juan Carlos

## Dedicatoria

*A mis padres por su apoyo incondicional durante mis 23 años de vida.*

*A la familia Arias Moreno, por enseñarme el amor por el estudio y la disciplina. Por llenarme de amor en mi infancia.*

*A mis hermanas por su amor y paciencia, a Natalia por siempre apoyarme en cada proyecto emprendido y por su ejemplo de trabajo constante y la importancia de nunca dejar de aprender.*

*A mis compañeros de carrera y amigos para la vida, Angie Naranjo, Lessly Padilla e Iván Manrique.*

*A Selene Guerrero por acompañarme durante los tres años más importantes de mi vida, por su amor incondicional, paciencia, apoyo y enseñanzas.*

*Daniela*

### **Agradecimientos**

Al profesor Francisco Velandia, director del proyecto, por su guía y apoyo incondicional durante el desarrollo del presente trabajo.

Al grupo de investigación en gestión y optimización de sistemas GEOMATICA UIS por su apoyo en la toma de fotografías aéreas y su procesamiento.

A los ingenieros Miguel y Jonathan por su colaboración y apoyo en las actividades de campo.

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos las herramientas necesarias para nuestra formación profesional, durante los años vividos en esta alma máter.

A la Escuela de Geología, docentes y personal administrativo que hicieron posible culminar con éxito nuestro proceso de aprendizaje.

## Tabla de Contenido

<b>Resumen.....</b>		<b>17</b>
<b>Introducción .....</b>		<b>19</b>
<b>1. Localización geográfica del área de estudio.....</b>		<b>20</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema.....</b>		<b>21</b>
<b>1.2. Justificación .....</b>		<b>22</b>
<b>1.3. Objetivos .....</b>		<b>24</b>
<b>1.3.1. Objetivo General.....</b>		<b>24</b>
<b>1.3.2. Objetivos Específicos. ....</b>		<b>24</b>
<b>1.4. Metodología.....</b>		<b>25</b>
<b>1.4.1. Análisis de antecedentes y estado actual del conocimiento. ....</b>		<b>25</b>
<b>1.4.2. Estratigrafía.....</b>		<b>26</b>
<b>1.4.2.1. Reconocimiento y adquisición de fotografías.....</b>		<b>26</b>
<b>1.4.2.2. Levantamiento de columnas estratigráficas.....</b>		<b>26</b>
<b>1.4.2.3. Descripción de facies.....</b>		<b>27</b>
<b>1.4.3. Sedimentología. ....</b>		<b>29</b>
<b>1.4.3.1. Conteo de clastos. ....</b>		<b>29</b>
<b>1.4.4. Análisis Estadístico. ....</b>		<b>30</b>
<b>1.4.4.1. Distribución normal. ....</b>		<b>30</b>
<b>1.4.4.2. Desviación estándar. ....</b>		<b>31</b>

1.4.4.3.	<i>Media.</i> .....	31
1.4.4.4.	<i>Frecuencia.</i> .....	31
1.4.5.	<b>Desarrollo del documento final y conclusiones de proyecto.</b> .....	31
2.	<b>Marco Teórico.</b> .....	31
2.1.	<b>Generalidades de abanicos aluviales y ríos trezados</b> .....	31
2.1.1.	<b>Abanicos aluviales.</b> .....	31
2.1.1.1.	<i>Corrientes confinadas.</i> .....	32
2.1.1.2.	<i>Corrientes no confinadas</i> .....	34
2.1.1.3.	<i>Tipos de flujo</i> .....	35
2.1.2.	<b>Ríos trezados</b> .....	38
2.1.2.1.	<i>Modelos de sistemas trezados con predominio de gravas (shallow gravel braided).</i> .....	38
2.1.2.2.	<i>Modelos de sistemas trezados de arenas.</i> .....	39
3.	<b>Marco Geológico</b> .....	43
3.1.	<b>Marco Geológico Regional.</b> .....	43
3.1.1.	<b>Cordillera Oriental – Macizo De Santander.</b> .....	44
3.1.1.1.	<i>Geología Regional.</i> .....	44
3.1.1.2.	<i>Estratigrafía de las posibles áreas fuente.</i> .....	45
3.2.	<b>Marco Geológico Local</b> .....	47
3.2.1.	<b>Estratigrafía</b> .....	47
3.2.1.1.	<i>Formación Bucaramanga.</i> .....	47
3.1.1.	<b>Estructural - Tectónica local.</b> .....	49

3.1.1.2.	<i>Falla Bucaramanga.</i> .....	50
3.1.1.3.	<i>Falla Suárez.</i> .....	50
4.	<b>Resultados</b> .....	51
4.1.	<b>Análisis sedimentológico y estratigráfico de la Formación Bucaramanga</b> .....	51
4.1.1.	<b>Miembro Pre-Órganos</b> .....	53
4.1.2.	<b>Miembro Órganos</b> .....	55
4.1.3.	<b>Miembro Finos.</b> .....	56
4.1.4.	<b>Miembro Gravoso.</b> .....	57
4.1.5.	<b>Miembro Limos Rojos.</b> .....	61
4.1.6.	<b>Facies Sedimentarias.</b> .....	61
4.1.7.	<b>Proveniencia de los sedimentos</b> .....	62
4.2.	<b>Cartografía Geológica</b> .....	67
4.2.1.	<b>Levantamiento fotográfico.</b> .....	67
4.2.2.	<b>Mapa Geológico del área de estudio.</b> .....	68
4.3.	<b>Descripción de unidades geológicas</b> .....	70
4.3.1.	<b>Miembro Finos (Qbf)</b> .....	70
4.3.1.1.	<i>Columna Estratigráfica y descripción de muestras (<math>\Delta 1</math>): Miembro Finos.</i> .....	71
4.3.1.2.	<i>Columna Estratigráfica y descripción de muestras (<math>\Delta 2</math>): Miembro Finos nivel superior</i> .....	77
4.3.2.	<b>Miembro Gravoso (Qbg)</b> .....	87
4.3.2.1.	<i>Columna Estratigráfica y descripción de muestras (<math>\Delta 3</math>): contacto entre el Miembro Finos nivel superior y el Miembro Gravoso.</i> .....	88

<b>4.4.</b>	<b>Correlación de columnas estratigráficas.....</b>	<b>98</b>
<b>4.5.</b>	<b>Análisis composicional de clastos.....</b>	<b>101</b>
<b>5.</b>	<b>Discusión.....</b>	<b>105</b>
<b>5.1.</b>	<b>Ambiente Depositacional.....</b>	<b>106</b>
<b>5.2.</b>	<b>Marco Tectónico.....</b>	<b>109</b>
<b>5.3.</b>	<b>Proveniencia .....</b>	<b>110</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>116</b>
<b>7.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>117</b>
	<b>Referencias.....</b>	<b>118</b>

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Descripción de las unidades litoestratigráficas que se encuentran como posible fuente del sedimento para la Fm Bucaramanga .....	46
Tabla 2. División de la Formación Bucaramanga según diferentes autores .....	52
Tabla 3. Cuadro comparativo del Miembro Pre-órganos.....	54
Tabla 4. Cuadro comparativo del Miembro Órganos .....	58
Tabla 5. Cuadro comparativo del Miembro Finos .....	59
Tabla 6. Cuadro comparativo del Miembro Gravoso .....	60
Tabla 7. Cuadro comparativo del Miembro Limos Rojos .....	61
Tabla 8. Proveniencia de los sedimentos que componen la Formación Bucaramanga según propuestas de diferentes autores .....	66
Tabla 9. Tipos composicionales de los clastos obtenidos mediante conteo .....	101
Tabla 10. Resultados de frecuencias texturales del conteo de clastos .....	103
Tabla 11. Resultados de redondez y esfericidad de los clastos analizados en el conteo .....	104

## Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Visualización geográfica de la zona de estudio, que corresponde al área de las instalaciones del relleno sanitario El Carrasco. ....	21
<i>Figura 2.</i> Clasificación de Facies sedimentarias con su respectiva asociación ambiental. Tomado de Miall (1997). ....	28
<i>Figura 3.</i> A: Esquema de la grilla usada para el conteo. B: Fotografía donde se esquematiza el procedimiento de distribución de las grillas sobre el afloramiento para el conteo. ....	29
<i>Figura 4.</i> Gráficas de tendencia asimétrica de una distribución normal, mostrando la asimetría hacia la izquierda (A) y la asimetría hacia la derecha (B). Tomado de Minitab, 2018. ....	30
<i>Figura 5.</i> Relación profundidad del cauce vs el gradiente crítico para un conjunto de valores calculados del coeficiente de rugosidad Manning y para ambientes de río y abanicos. Obtenido de Blair y McPherson (1994, en Arche, 2010). ....	33
<i>Figura 6.</i> Gráfica donde se muestra la relación directa entre las variables de pendiente y profundidad con el tamaño de los clastos. ....	34
<i>Figura 7.</i> Gráfico donde se muestran tres tipos de depósitos cohesivos: A: Depósito masivo con fábrica matriz-soportada, B: Depósito masivo con fábrica clasto soportada; y C: Depósito estratificado con su nivel inferior de flujo cohesivo, el superior se comporta como un flujo rígido. Obtenido de Lowe (1982, en Arche, 2010).....	36
<i>Figura 8.</i> Columnas esquemáticas de las principales características que muestran los debris flow y otras facies asociadas. Obtenido de Nemec y Steel (1984, en Arche, 2010).....	37

<i>Figura 9.</i> Columnas esquemáticas de las principales secuencias de sistemas entrelazados con predominio de gravas. Las flechas verticales marcan secuencias granodecrecientes y estratodecrecientes. Obtenido de Miall (1999, en Arche, 2010).....	39
<i>Figura 10.</i> Columnas esquemáticas de las principales secuencias de sistemas entrelazados con predominio de arenas. Las flechas verticales marcan secuencias granodecrecientes y estratodecrecientes. Obtenido de Miall (1999, en Arche, 2010).....	41
<i>Figura 11.</i> Modelos de los ríos entrelazados que presentan predominio de gravas. Obtenido de Miall (1999, en Arche, 2010).....	42
<i>Figura 12.</i> Modelos de los ríos entrelazados que presentan predominio de arenas. Obtenido de Miall (1999, en Arche, 2010).....	42
<i>Figura 13.</i> Marco geológico regional que alberga al área de estudio, donde se observa: a) Confluencia de las placas tectónicas Nazca y Suramericana, b) La Cordillera de los Andes, c) Mapa geológico de Colombia (2015), que incluye la Cordillera Oriental con el Macizo de Santander, d) Zona de estudio mostrada en una sección del mapa Geológico del Cuadrángulo H-12.....	43
<i>Figura 14.</i> Bloque diagrama que muestra las tres zonas morfológicas en las que se dividió regionalmente la zona de estudio. Tomado y modificado de Niño & Vargas (1992). .....	45
<i>Figura 15.</i> Orto mosaico obtenido a partir de la nube de puntos con herramientas de geoprosesamiento en software SIG, mostrando la disposición espacial de los afloramientos $\Delta 2$ y $\Delta 3$ . El afloramiento $\Delta 1$ no se muestra en la imagen por restricciones administrativas de la EMAB en el relleno sanitario. ....	68
<i>Figura 16.</i> Mapa geológico mostrando las unidades aflorantes en la zona de estudio, que corresponden a los Miembros Qbo, Qbf, Qbg y Qblr de la Fm. Bucaramanga.....	69

<i>Figura 17.</i> Fotografía del afloramiento del Miembro Finos ( $\Delta 1$ ), donde se evidencia el contacto entre los niveles inferior (A1) y superior (B1 y C1).....	71
<i>Figura 18.</i> Columna Estratigráfica del Miembro Finos ( $\Delta 1$ ), contacto entre el nivel inferior (A1) y el nivel superior (B1 y C1).....	72
<i>Figura 19.</i> Fotografía de la muestra JD-1-1. ....	74
<i>Figura 20.</i> Fotografía de la muestra JD-1-2: arena lodosa. ....	75
<i>Figura 21.</i> Fotografía de la muestra JD-1-4: arcilla masiva. ....	76
<i>Figura 22.</i> Fotografía de afloramiento del Miembro Finos nivel superior ( $\Delta 2$ ), obtenida por medio de imágenes aéreas empleando dron con el apoyo de GEOMÁTICA UIS. ....	77
<i>Figura 23.</i> Columna Estratigráfica ( $\Delta 2$ ) correspondiente al Miembro Finos nivel superior.....	79
<i>Figura 24.</i> Diaclasas en la base del afloramiento $\Delta 2$ (D <sub>1</sub> : familia 1 y D <sub>2</sub> : familia 2). ....	80
<i>Figura 25.</i> Fotografía de la muestra JD-2-4: arena fina lodosa.....	82
<i>Figura 26.</i> Fotografía de la muestra JD-2-1: arena gruesa ligeramente gravosa.....	85
<i>Figura 27.</i> Fotografía de la muestra JD-2-2: arena media lodosa. ....	86
<i>Figura 28.</i> Fotografía de la muestra JD-2-3: arena media lodosa. ....	87
<i>Figura 29.</i> Fotografía mostrando el afloramiento del Miembro Gravoso, que se ubica al tope de la columna estratigráfica $\Delta 3$ . ....	88
<i>Figura 30.</i> Fotografía del afloramiento $\Delta 3$ , correspondiente al nivel superior del Miembro Finos (A3, B3, C3, D3 y E3) en contacto erosivo con el Miembro Gravoso (F3) .....	89
<i>Figura 31.</i> Columna Estratigráfica $\Delta 3$ mostrando el contacto entre el Miembro Finos (nivel superior) y el Miembro Gravoso.....	90
<i>Figura 32.</i> Fotografía tomada por los autores mostrando el contacto entre un coluvión y el Miembro Finos de la Fm. Bucaramanga.....	92

<i>Figura 33.</i> Fotografía de la muestra JD-3-1: arenisca fina lodosa. ....	93
<i>Figura 34.</i> Fotografía de la muestra JD-3-2: arenisca gruesa ligeramente conglomerática. ....	94
<i>Figura 35.</i> Fotografía de la muestra JD-3-3: arenisca gruesa ligeramente conglomerática. ....	95
<i>Figura 36.</i> Fotografía de la muestra JD-3-4: arenisca muy gruesa conglomerática. ....	96
<i>Figura 37.</i> Fotografía de la muestra JD-3-5: arenisca media. ....	97
<i>Figura 38.</i> Fotografía de la muestra JD-3-6: arenisca media. ....	97
<i>Figura 39.</i> Correlación Topográfica de las Columnas Estratigráficas .....	99
<i>Figura 40.</i> Columna Estratigráfica generalizada de la Fm. Bucaramanga, basada en recopilación bibliográfica. ....	100
<i>Figura 41.</i> Histograma de frecuencia para la composición de los clastos de acuerdo con el tipo de roca.....	102
<i>Figura 42.</i> Distribución normal del tamaño de los clastos mostrando que la mayoría de los clastos se concentran entre 30 y 70 mm. ....	103
<i>Figura 43.</i> Histograma de frecuencia textural para los clastos analizados en el conteo. ....	104
<i>Figura 44.</i> Bloquediagrama simplificado mostrando el posible ambiente de depósito para la Fm. Bucaramanga.....	115

## Resumen

**Título:** Caracterización sedimentológica de la Formación Bucaramanga en el relleno sanitario El Carrasco\*

**Autores:** Gutiérrez Barrera, Juan Carlos\*\*

Pico Barajas, Daniela\*\*

**Palabras clave:** Miembro Finos, Miembro Gravoso, Sedimentología, Conteo de clastos, Abanico aluvial, Río trenzado, Proveniencia, Drone.

### Descripción:

La Formación Bucaramanga es una unidad litoestratigráfica que se divide en cinco miembros, los cuales, de base a techo son: Pre-Órganos, Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos. En esta investigación se desarrolla la caracterización sedimentológica de los miembros Finos y Gravoso de la Fm. Bucaramanga que afloran dentro de las instalaciones del relleno sanitario El Carrasco, sitio de disposición final de residuos que sirve al área metropolitana de Bucaramanga y a otros dieciséis municipios del Departamento de Santander. Para lo anterior, se emplea el levantamiento topográfico a partir de fotografías aéreas por medio del uso de drone; además, se realiza el levantamiento de columnas estratigráficas en tres afloramientos que se encuentran disponibles para el presente estudio y el conteo de clastos en un nivel que corresponde al Miembro Gravoso.

Además, se presenta una recopilación bibliográfica de los estudios realizados para toda la formación, a partir de la cual, se abre una discusión respecto al origen de los sedimentos y a la formación de la cuenca sobre la cual se depositaron dichos sedimentos. Con base en este análisis, se propone que el ambiente de depositación corresponde a un sistema fluvial típico, donde convergen abanicos aluviales desde el Macizo de Santander y el paleocauce Sogamoso-Chicamocha.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño.

### Abstract

**Title:** Sedimentological characterization of the Bucaramanga Formation in The Carrasco sanitary filling\*

**Authors:** Gutiérrez Barrera, Juan Carlos\*\*

Pico Barajas, Daniela\*\*

**Keywords:** Finos member, Gravoso member, sedimentology, clast count, alluvial fan, braided river, provenance, drone.

#### **Description:**

The Bucaramanga Formation is a lithostratigraphic unit that is divided into five members, which from base to top are: Pre-Órganos, Órganos, Finos, Gravoso and Limos Rojos. In this study, we develop a sedimentological characterization of the Finos and Gravoso members of the Bucaramanga Formation that outcrops within the El Carrasco sanitary landfill facilities, a final waste disposal site that serves to the Bucaramanga's metropolitan area and sixteen other municipalities of the Santander Department. For the above, is used topographic survey from aerial photographs using drone; In addition, the lifting of stratigraphic columns in three outcrops that are available for the present study and the counting of clasts is carried out at a level corresponding to the Gravoso Member.

Moreover, a bibliographic compilation of the studies carried out for the whole formation is presented, from which a discussion is opened regarding the origin of the sediments and the formation of the basin on which those sediments were deposited. Based on this analysis, it is proposed that the deposition environment corresponds to a typical river system, where converge alluvial fans from the Santander Massif and the Sogamoso-Chicamocha paleoriver.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño.

## Introducción

La caracterización sedimentológica permite determinar el ambiente en el cual se generaron los depósitos y su evolución dentro del ciclo sedimentario, a partir de características texturales, composicionales, estructuras sedimentarias y geoformas. Este tipo de estudios desarrollados en depósitos cuaternarios cobran importancia en Colombia ya que ciudades como Bogotá, Medellín, Cali y Bucaramanga se han asentado sobre estos cuerpos aprovechando sus características morfológicas.

La geología de la capital santandereana, donde predomina la Formación Bucaramanga, ha sido objeto de estudio por diferentes autores durante los últimos 70 años, debido a los problemas de erosión que ha presentado el depósito cuaternario; con el fin de dar una solución, está vigente el debate respecto a la proveniencia de los sedimentos, ya que el ambiente de formación del depósito, le imprime sus propiedades físicas, las cuales determinan el comportamiento del material, para brindar una solución geotécnica adecuada.

La Formación Bucaramanga presenta un espesor estimado de 250 m (Ingeominas, 2001), dividida en cinco segmentos: Pre-Órganos, Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos (Niño & Vargas, 1992), de los cuales el miembro Órganos ha sido el más estudiado por su espesor, extensión y su tendencia a erosionarse, sin embargo, los demás miembros no cuentan con tantos estudios de este tipo, por ello el presente trabajo de investigación tiene como objeto dar un aporte al conocimiento de los Miembros Finos y Gravoso dentro del relleno sanitario El Carrasco. Aunque en la zona de

estudio aflora el Miembro Órganos, sólo se contempla su cartografía geológica sin el detalle estratigráfico y sedimentológico debido a las dificultades de acceso por el manejo del relleno.

Por medio de la caracterización de estas unidades se pretende generar un registro de los miembros aflorantes en el relleno que sirva de base para mejorar las condiciones geotécnicas en la depositación de los residuos y su comportamiento a futuro en el marco del cierre definitivo del relleno, proceso que se encuentra vigente; además que pueda complementar el conocimiento de la geología en la región.

### **1. Localización geográfica del área de estudio**

La zona seleccionada para el desarrollo del estudio se encuentra al occidente de la Cordillera Oriental de Colombia, en el departamento de Santander, en el límite de los municipios de Bucaramanga y Girón sobre la vía que los comunica, en inmediaciones del centro de eventos y exposiciones (CENFER) y la plaza de toros Señor de los Milagros, sector en el que se desvía tomando una vía terciaria que sirve de acceso al relleno sanitario El Carrasco, que presta servicio a Bucaramanga y su área metropolitana (*Ver Figura 1*).

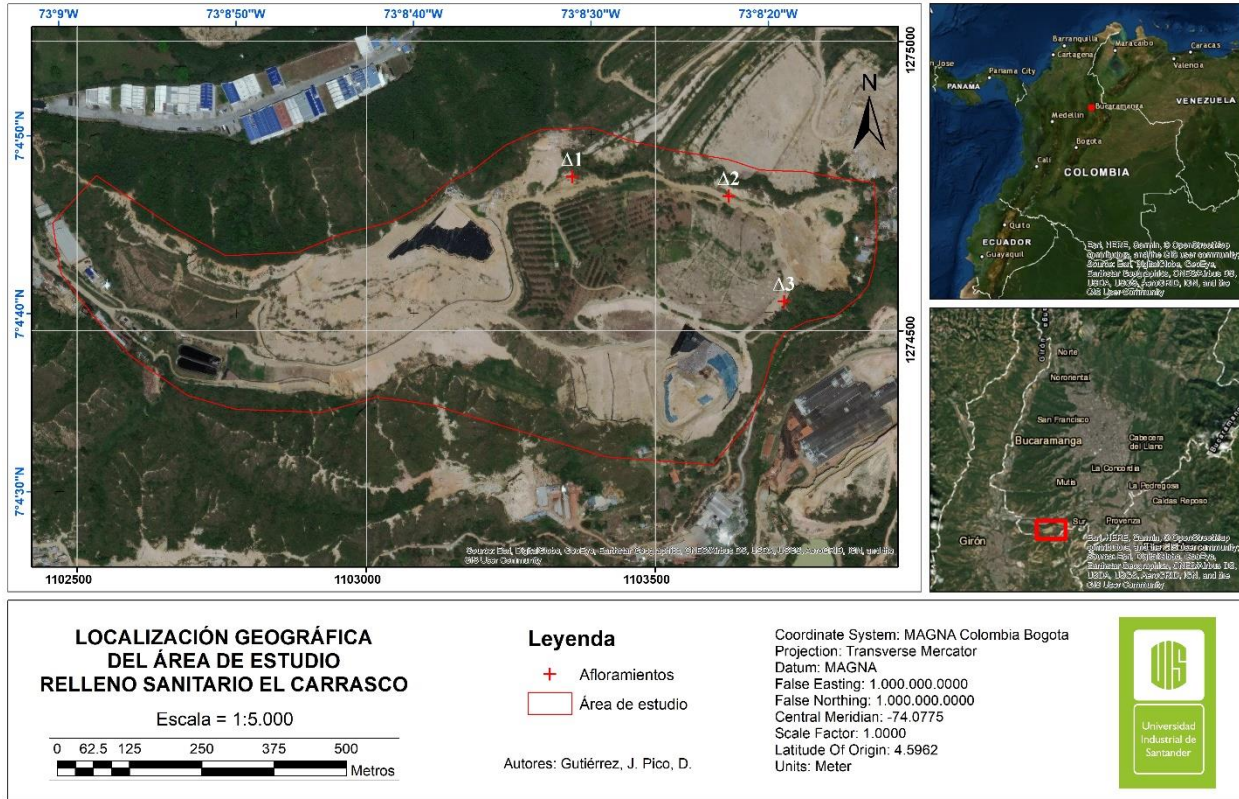


Figura 1. Visualización geográfica de la zona de estudio, que corresponde al área de las instalaciones del relleno sanitario El Carrasco.

### 1.1. Planteamiento del problema

La Formación Bucaramanga se define como unidad litoestratigráfica compuesta por cinco miembros: Pre-Órganos, Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos, sobre la cual se han desarrollado diversos trabajos, centrados principalmente en caracterizaciones sedimentológicas y análisis, tanto de la erosión como de la proveniencia de los sedimentos que la conforman, siendo objeto de estudio principalmente el Miembro Órganos. Sin embargo, sus otros miembros, en especial Finos y Gravoso, no cuentan con estudios de este tipo, ni tampoco la zona propuesta para el estudio. Además,

se ha generado discusión en torno a la proveniencia de los sedimentos que dieron origen al depósito cuaternario, discusión que a la fecha aún sigue vigente.

Por otra parte, el problema de la disposición de basuras y el pasivo ambiental generado por lixiviados provenientes del relleno sanitario El Carrasco aún es objeto de estudios por parte de la comunidad científica y las autoridades ambientales. Es pertinente mencionar que este sitio de disposición final de residuos que se sitúa sobre la Formación Bucaramanga, y sirve al área metropolitana y otros municipios de Santander, ha enfrentado diversos procesos jurídicos a lo largo de su historia y actualmente se encuentra en proceso de cierre debido a la orden judicial en el marco de Acción Popular radicada con el No. 2002-2891 manejado por el juzgado Quince Administrativo del Circuito de Bucaramanga.

La presente propuesta de trabajo de grado plantea la caracterización sedimentológica de la Formación Bucaramanga en inmediaciones de El Carrasco, con el fin de mejorar el conocimiento del subsuelo y brindar soporte técnico en la toma de decisiones del proceso de cerramiento y abandono de El Carrasco, y a la necesidad de evaluar la manera cómo se está presentando la contaminación por lixiviados del relleno sanitario.

## **1.2. Justificación**

El crecimiento demográfico trae consigo el aumento en los desechos que se generan y una necesidad de un lugar más grande para la acumulación de los residuos producidos por el humano, desarrollándose así los rellenos sanitarios, como el espacio destinado a la recolección de las basuras.

El relleno sanitario El Carrasco, sitio de disposición final de residuos, en el cual se manejan las basuras de Bucaramanga y 16 municipios de la región, incluyendo los del área metropolitana, ha

presentado varias irregularidades en sus operaciones en cuanto a su capacidad, contaminación odorífera y vida útil. Debido a esto, la comunidad aledaña al sector ha presentado inconformidad con la continuidad de las operaciones de este vertedero, instaurando acciones jurídicas hasta que, en el año 2011, por fallo del Tribunal Administrativo de Bucaramanga, se ratifica el cierre definitivo. En el año 2013 fue emitida, mediante Decreto Municipal N° 0190 del año 2013, una declaratoria de existencia de situación de riesgo de calamidad pública, que da lugar al estado de emergencia sanitaria y ambiental en el Municipio de Bucaramanga, el cual se ha venido prorrogando mediante Decretos como el N° 0158 del año 2015, que habilitan la continuidad de la disposición final de residuos en este sitio.

Según la Empresa de Aseo de Bucaramanga (EMAB S.A. E.S.P), entidad encargada del manejo de este relleno, la cantidad de residuos sólidos dispuestos en el lugar para el año 2016 fue de 191.864 toneladas (Informe, Alcaldía de Bucaramanga, 2016, p. 183), lo cual convierte a Bucaramanga, en la ciudad del país que más genera residuos sólidos por habitante, según el diagnóstico realizado por la administración municipal.

Por tanto, este estudio pretende caracterizar la geología del cuerpo cuaternario sobre el cual se edifica este relleno, con la finalidad de generar conocimiento científico, para que esté disponible a posteriores trabajos, permitiendo identificar y prevenir posibles dificultades en cuanto al comportamiento del material al momento de disponer los desechos y, con el fin de monitorear las actividades técnicas de abandono del relleno en cumplimiento al fallo proferido que ordena su cierre definitivo.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General.**

Realizar la caracterización sedimentológica de las unidades aflorantes que hacen parte de la Formación Bucaramanga, en los alrededores del relleno sanitario El Carrasco.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos.**

Definir la cartografía geológica de las unidades aflorantes en la zona de estudio, apoyados en trabajo de campo, sedimentología y fotografías aéreas obtenidas por medio del uso de un drone.

Determinar las características sedimentológicas de los miembros Finos y Gravoso que hacen parte de la Fm. Bucaramanga.

Analizar composicionalmente muestras de las unidades aflorantes en la zona de estudio, con el propósito de dar una hipótesis sobre el origen de estos sedimentos.

## 1.4. Metodología

El desarrollo de este proyecto de investigación consta de varias fases: Revisión y recopilación bibliográfica, trabajo de campo, análisis e interpretación de resultados y elaboración del documento final.

**1.4.1. Análisis de antecedentes y estado actual del conocimiento.** La primera etapa de este proyecto consiste en la recopilación bibliográfica de estudios correspondientes a metodologías para la caracterización de cuerpos cuaternarios, estudios geológicos y geotécnicos desarrollados en la Formación Bucaramanga, en especial dentro de las instalaciones del relleno sanitario El Carrasco, además de tesis y documentos de la Fm. Bucaramanga con énfasis en los miembros Finos y Gravoso.

Para este proyecto se obtuvo información de diversas fuentes, principalmente tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander enfocadas en la Fm. Bucaramanga como las de Garnica & Niño (2015), Solano (2016) y Franco & Ramírez (2018). Además, se consultaron documentos como los de Hubach (1952), De Porta (1959) y Julivert (1963) quienes fueron pioneros en el reconocimiento de la formación.

La información correspondiente al relleno sanitario fue obtenida especialmente de informes de la Corporación autónoma regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y la Empresa de Aseo de Bucaramanga (EMAB). Así mismo, para la información cartográfica se consideraron las planchas 120-I-B y 120-II-B y para la cartografía geológica autores como Niño & Vargas (1992), Ingeominas (2001) y Jiménez et al. (2015).

Finalmente, con esta base de datos adquirida se procede a la etapa de trabajo de campo.

**1.4.2. Estratigrafía.** La obtención de columnas estratigráficas implicó la adquisición de fotografías aéreas, descripción de afloramientos, conteo de clastos, descritos en las siguientes fases:

**1.4.2.1. Reconocimiento y adquisición de fotografías.** El reconocimiento de campo consistió en hacer un recorrido identificando los afloramientos disponibles dentro de las instalaciones del relleno para el desarrollo del proyecto. En esta fase se encontraron tres de ellos, los cuales presentaban dificultad para realizar levantamiento de columna debido a su altura de alrededor de 15 m, por lo cual se implementa la adquisición de fotografías mediante drone. Con el apoyo del grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas UIS, se realizó un cubrimiento fotográfico de la zona de estudio, empleando un drone DJI Phantom 4 dotado de una cámara de alta resolución. A partir de esta información obtenida se realizó la fotointerpretación, que abarca una correlación estratigráfica teniendo en cuenta características texturales evidenciables, además del grado de erosión, la estratificación, la coloración y rasgos morfológicos distintivos, las cuales fueron verificadas en la fase de campo. Estos datos además de ayudar a la cartografía geológica se usan también como apoyo para el levantamiento y descripción de las columnas estratigráficas.

**1.4.2.2. Levantamiento de columnas estratigráficas.** En cada uno de los tres afloramientos se realizó el siguiente procedimiento para obtener las columnas estratigráficas:

1. Descripción general del afloramiento e identificación del área más adecuada para levantar la columna.
2. Levantamiento de la columna usando el formato mostrado en el *Anexo 1*, donde se incluye la descripción litológica completa tanto textural como composicional, geometría de la estratificación y estructuras sedimentarias presentes.

**1.4.2.3. Descripción de facies.** Las facies sedimentarias corresponden a un conjunto de rocas sedimentarias que pueden ser definidas y separadas de otras por su litología, geometría, estructuras sedimentarias y contenido fósil (Miall, 1996). La interpretación de estas permite entender el proceso sedimentario y el ambiente de depositación que dieron origen a las rocas analizadas.

Para las unidades litológicas aquí analizadas se usó la clasificación de facies sedimentarias planteada por Miall (1997), mostrada en la *Figura 2*.

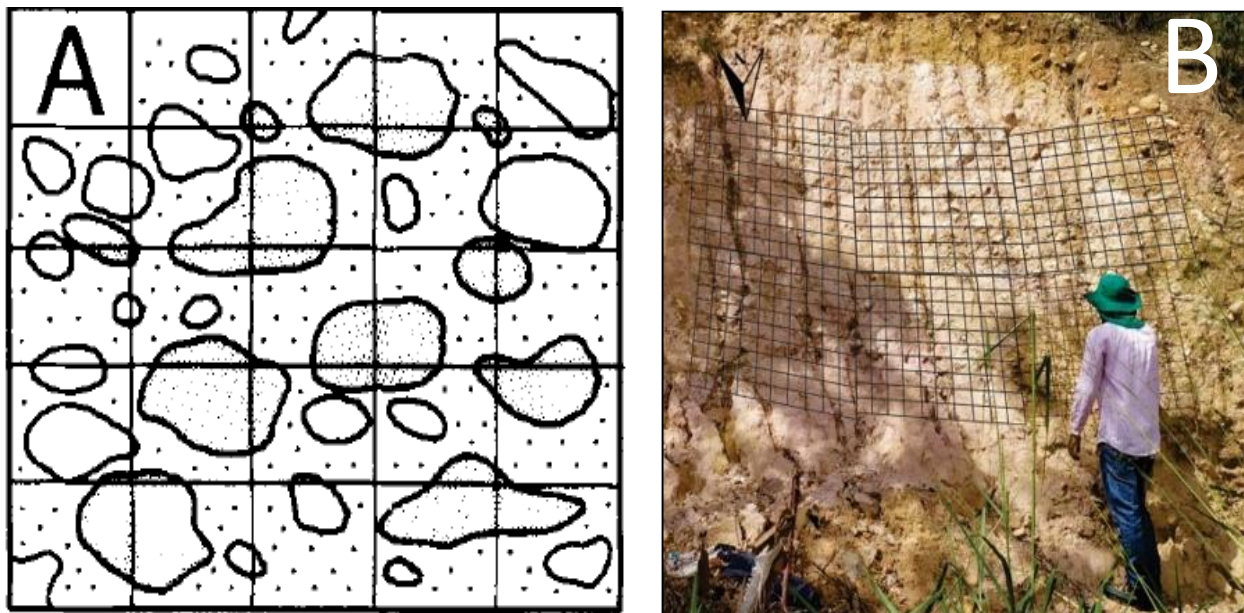
Facies code	Facies	Sedimentary structures	Interpretation
Gmm	Matrix-supported, massive gravel	Weak grading	Plastic debris flow (high-strength, viscous)
Gmg	Matrix-supported gravel	Inverse to normal grading	Pseudoplastic debris flow (low strength, viscous)
Gci	Clast-supported gravel	Inverse grading	Clast-rich debris flow (high strength), or pseudoplastic debris flow (low strength)
Gcm	Clast-supported massive gravel	-	Pseudoplastic debris flow (inertial bedload, turbulent flow)
Gh	Clast-supported, crudely bedded gravel	Horizontal bedding, imbrication	Longitudinal bedforms, lag deposits, sieve deposits
Gt	Gravel, stratified	Trough cross-beds	Minor channel fills
Gp	Gravel, stratified	Planar cross-beds	Transverse bedforms, deltaic growths from older bar remnants
St	Sand, fine to very coarse, may be pebbly	Solitary or grouped trough cross-beds	Sinuuous-crested and linguoid (3-D) dunes
Sp	Sand, fine to very coarse, may be pebbly	Solitary or grouped planar cross-beds	Transverse and linguoid bedforms (2-D dunes)
Sr	Sand, very fine to coarse	Ripple cross-lamination	Ripples (lower flow regime)
Sh	Sand, very fine to coarse, may be pebbly	Horizontal lamination parting or streaming lineation	Plane-bed flow (critical flow)
Sl	Sand, very fine to coarse, may be pebbly	Low-angle (< 15°) cross-beds	Scour fills, humpback or washed-out dunes, antidunes
Ss	Sand, fine to very coarse, may be pebbly	Broad, shallow scours	Scour fill
Sm	Sand, fine to coarse	Massive, or faint lamination	Sediment-gravity flow deposits
Fl	Sand, silt, mud	Fine lamination, very small ripples	Overbank, abandoned channel, or waning flood deposits
Fsm	Silt, mud	Massive	Backswamp or abandoned channel deposits
Fm	Mud, silt	Massive, desiccation cracks	Overbank, abandoned channel, or drape deposits
Fr	Mud, silt	Massive, roots, bioturbation	Root bed, incipient soil
C	Coal, carbonaceous mud	Plant, mud films	Vegetated swamp deposits
P	Paleosol carbonate (calcite, siderite)	Pedogenic features: nodules, filaments	Soil with chemical precipitation

Figura 2. Clasificación de Facies sedimentarias con su respectiva asociación ambiental. Tomado de Miall (1997).

### 1.4.3. Sedimentología.

**1.4.3.1. Conteo de clastos.** El conteo de clastos es una herramienta usada para evaluar la procedencia sedimentaria a partir de una metodología cualitativa, aunque se pueden aplicar metodologías cuantitativas como la propuesta por Howard (1993). Para la finalidad de este documento se realizó un procedimiento donde los resultados obtenidos son la frecuencia composicional de los clastos medidos en campo, a partir de métodos cuantitativos.

El procedimiento a seguir es colocar sobre el afloramiento una grilla de 1 m<sup>2</sup> con divisiones cada 10 cm en la vertical y horizontal (*Figura 3*), posteriormente se describen las características texturales y composicionales de los clastos que coincidan con los nodos de la grilla. Este proceso se repite sobre todo el nivel de gravas de interés hasta cubrirlo en totalidad. Por último, se generan unas tablas donde se registra las características texturales del clasto y el tipo de roca, información que posteriormente será usada para la interpretación de la proveniencia de sedimentos.



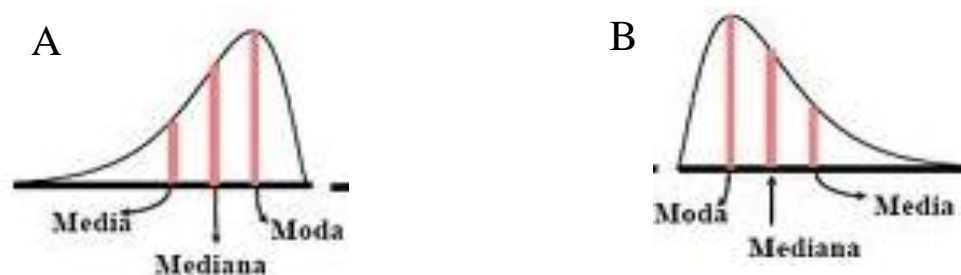
*Figura 3.* A: Esquema de la grilla usada para el conteo. B: Fotografía donde se esquematiza el procedimiento de distribución de las grillas sobre el afloramiento para el conteo.

**1.4.3.2. Paleocorrientes.** Por el alto estado de meteorización en el que se encuentran los afloramientos no fue posible observar estructuras sedimentarias, como estratificación cruzada u otras que sirvieran de base para determinar paleocorrientes. Además, los clastos que se usaron para el conteo no presentaron una imbricación predominante.

**1.4.4. Análisis Estadístico.** Con base en la información recolectada en la fase de campo, se procede con el análisis estadístico de los datos, principalmente los datos obtenidos en el conteo de clastos: composición y tamaño de los clastos, con el fin de relacionarlos con las unidades aflorantes en las cuencas de drenaje de los cauces asociados al transporte de los sedimentos que componen el depósito.

**1.4.4.1. Distribución normal.** Es una distribución con forma de campana donde las desviaciones estándar sucesivas con respecto a la media establecen valores de referencia para estimar el porcentaje de los datos observados (Minitab, 2018).

Las gráficas de distribución normal facilitan la interpretación de datos en la estadística, a partir de la campana generada se puede evidenciar la dispersión de los datos medidos y el valor más repetido (*Figura 4*); además la terminación asimétrica hacia la derecha o izquierda determinan mayor dispersión en los datos menores o mayores a la media respectivamente.



*Figura 4.* Gráficas de tendencia asimétrica de una distribución normal, mostrando la asimetría hacia la izquierda (A) y la asimetría hacia la derecha (B). Tomado de Minitab, 2018.

**1.4.4.2. Desviación estándar.** Es la medida de dispersión más común, que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media. Mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión. Se puede utilizar para establecer un valor de referencia y estimar la variación general de un proceso determinado (Minitab, 2018).

**1.4.4.3. Media.** La media aritmética o promedio representa el reparto equitativo, el equilibrio, la equidad. Es el valor que tendrían los datos, si todos ellos fueran iguales. O, también, el valor que correspondería a cada uno de los datos de la distribución si su suma total se repartiera por igual (Losada Liste, 2019).

**1.4.4.4. Frecuencia.** Se llama frecuencia, o frecuencia absoluta al número de individuos que presentan cierto valor de una variable determinada (Minitab, 2018).

**1.4.5. Desarrollo del documento final y conclusiones de proyecto.** Finalmente, se recopila toda la información del estudio obtenida a partir de este proyecto y se resume en el presente informe final, presentado en forma de libro ante la escuela de geología de la Universidad Industrial de Santander.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1. Generalidades de abanicos aluviales y ríos trenzados**

**2.1.1. Abanicos aluviales.** Corresponden a la acumulación de materiales clásticos en una zona donde se presenta una ruptura de pendiente a causa de la pérdida de encajamiento del canal

principal, generando un cuerpo de forma conoide generalmente, aunque la zona de acumulación puede condicionar la morfología del abanico resultante (Arche, 2010).

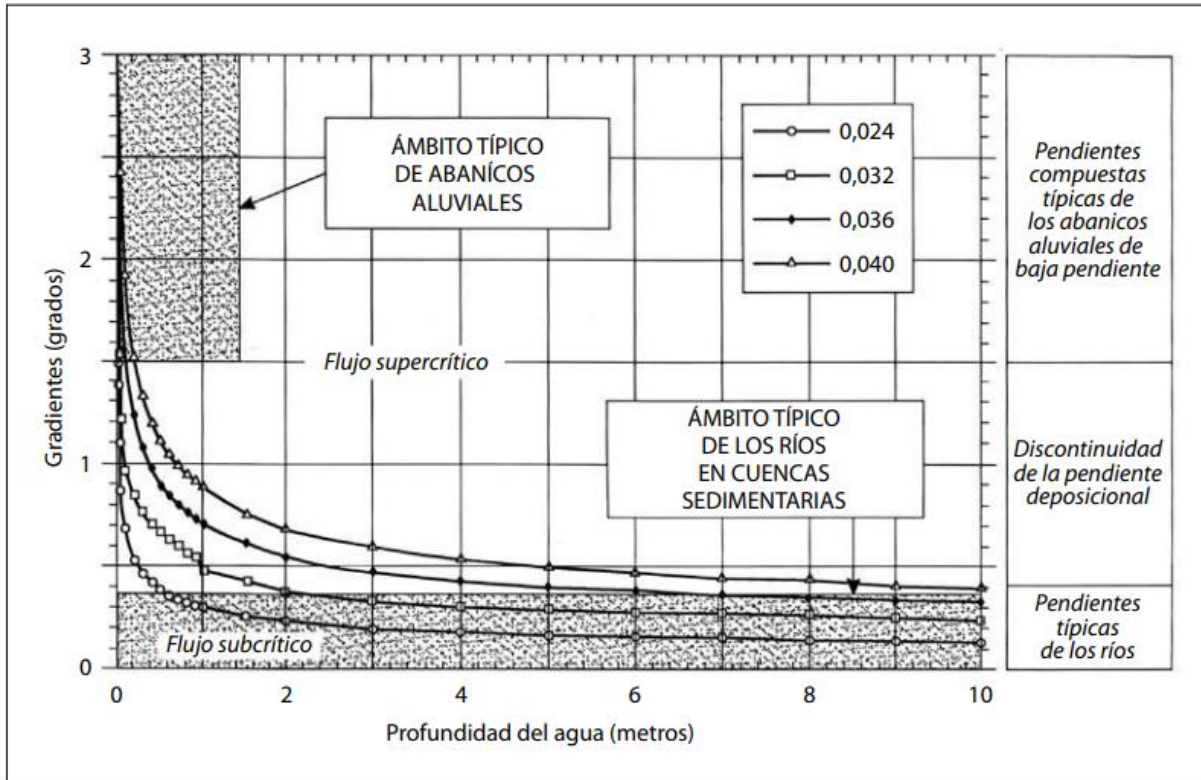
A través del tiempo se han considerado principalmente dos modelos de abanicos aluviales: el primero, abanico de medio árido caracterizado por su pequeño tamaño, morfología radial casi perfecta y flujos masivos con comportamiento no newtoniano; además de materiales depositados mediante flujos acuosos (ocasionales), que en determinados casos muestran extensiones considerables. El segundo, abanico de clima húmedo caracterizado por ser más continuos en el tiempo, con flujos predominantemente acuosos de comportamiento newtoniano.

Estos dos modelos no son una panacea en la actualidad, ya que es difícil distinguir si el origen de los depósitos es por abanicos aluviales o por ríos trezados, basándose únicamente en tipos de facies. Por tanto, se han propuesto un conjunto de características tanto de facies como de asociaciones de facies y geometrías de los litosomas, que pueden ayudar a diferenciar entre abanicos aluviales y ríos dentro de una secuencia estratigráfica (Arche, 2010).

**2.1.1.1. Corrientes confinadas.** Su flujo principal es agua y sus características de velocidad, régimen de flujo y fricción permanecen constantes mientras esté confinado. Esto depende de la interacción de las siguientes variables: gradiente, profundidad del flujo y resistencia al flujo (rugosidad de los materiales en el lecho).

Para mostrar la relación entre profundidad de flujo y gradiente se creó un diagrama con coeficientes de Manning puntuales y que incluyen desde sedimentos tipo arena hasta bloques. Este grafico ilustra que los abanicos aluviales tienen condiciones de régimen de flujo alto y los ríos condiciones de régimen de flujo bajo; además muestra una discontinuidad en la gráfica (inflexión de las curvas de gradiente critico) que coincide con la zona donde se produce un cambio brusco en

las condiciones de alto a bajo régimen de flujo. Cabe resaltar que este salto entre abanicos y sistemas fluviales en muchos casos es difícil de registrar (*Ver Figura 5*).



*Figura 5.* Relación profundidad del cauce vs el gradiente crítico para un conjunto de valores calculados del coeficiente de rugosidad Manning y para ambientes de río y abanicos. Obtenido de Blair y McPherson (1994, en Arche, 2010).

El tamaño de grano que puede transportar un flujo estará determinado por el gradiente y la profundidad de este, en la *Figura 6* se evidencia que la competencia de un fluido se incrementa proporcionalmente con el aumento de la pendiente y la profundidad.

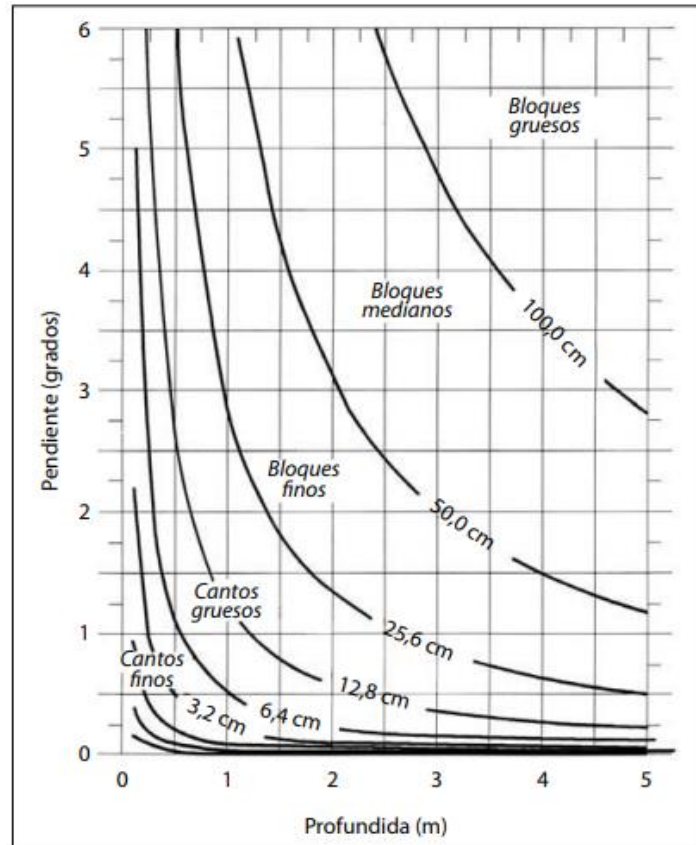


Figura 6. Gráfica donde se muestra la relación directa entre las variables de pendiente y profundidad con el tamaño de los clastos. Obtenido de Blair y McPherson (1994, en Arche, 2010).

**2.1.1.2. Corrientes no confinadas.** Los *sheet flood* constituyen depósitos de poco espesor con una laminación y estratificación plano-paralela en un corte paralelo a la superficie del abanico. Pueden desarrollar facies con estratificación cruzada contra corriente que gradualmente se pone subhorizontal y finalmente tiene una pendiente a favor de la corriente. Esto corresponde a condiciones de alto régimen de flujo con migración de antidunas.

Los *eventos de alta energía* corresponden a episodios excepcionales como la ruptura de una presa en donde el flujo avanza a gran velocidad transportando así bloques inmensos con materiales de granulometrías variadas. En el momento de máxima energía el transporte se da en forma de oleadas (*surges*) creando grandes barras deposicionales.

### 2.1.1.3. Tipos de flujo.

**Flujo gravitatorio del sedimento (FGS):** Se trata de flujos de materiales que se mueven en función de las pendientes topográficas más fuertes, mediante una fase continua (generalmente agua) existente entre las partículas, una fase discontinua correspondiente a los materiales granulares gruesos, y en el interior de un fluido encajante que se mantiene inmóvil (Arche, 2010, p. 104).

Considerando criterios de viscosidad y densidad estos FGS varían de *debris flow* a *fluidal flows*, donde los primeros presentan un comportamiento no newtoniano y los segundos son fluidos o de comportamiento newtoniano. Estas categorías se pueden subdividir si se considera el proceso de sustentación de las partículas durante el transporte, así:

**a) Flujos granulares (*grain flows*):** las partículas se mueven libremente a partir de la presión dispersiva generada por las sucesivas colisiones e impactos entre las propias partículas. Cuando las partículas son de granulometría arena, los flujos sólo pueden desarrollarse en medios subacuáticos a partir de pendientes variables entre 18° y 20° de inclinación, depositando capas unitarias del orden de 5 cm de grosor. En medios sedimentarios subaéreos han sido citados en zonas y episodios de acumulación eólica y con pendientes del orden de 25°-35° (Arche, 2010, p. 114).

**b) Flujos fluidizados (*fluidized flows*)**

**c) Flujos licuefactados (*liquefied flows*)**

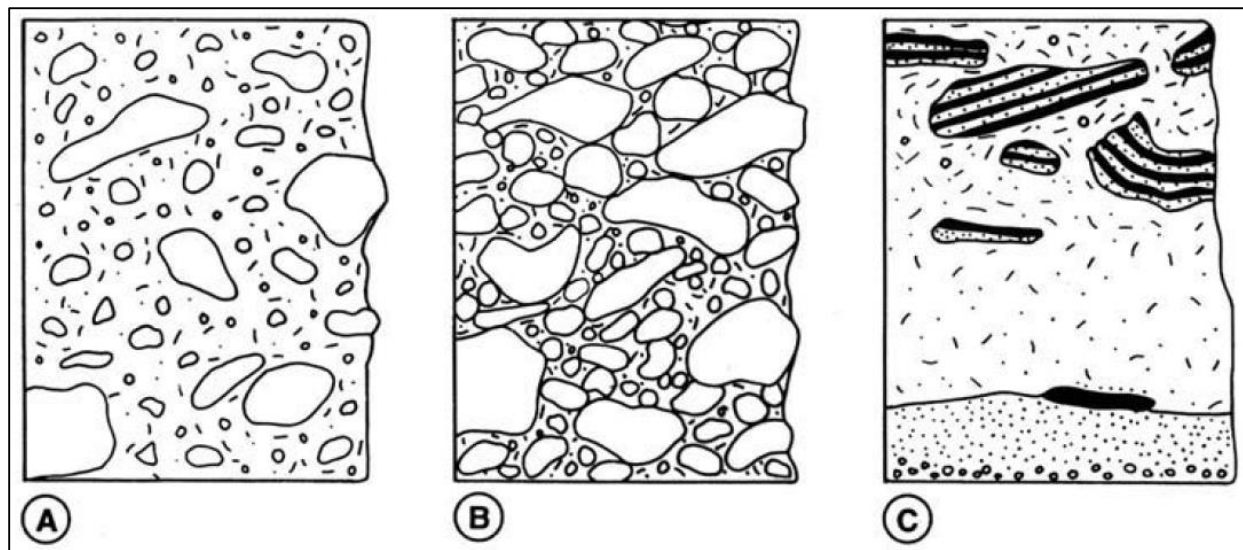
**d) Corrientes de turbidez (*turbidity currents*)**

**e) Coladas de fango y/o detritos (*mud flows, cohesive debris flows o debris flows*):** Transportan las partículas y la matriz de forma masiva. Los flujos de detritos desarrollados en contextos subaéreos se comportan como una masa única de agua y sedimentos. Los flujos de detritos que acostumbra a mostrar una fase continua que corresponde a agua y lutitas y una fase discontinua que corresponde a los clastos tienden a comportarse como un flujo antes que como un fluidal flow. El

transporte se efectúa mediante la cohesión mostrada por una matriz constituida por una mezcla de agua y sedimento, mostrando un comportamiento no newtoniano (Arche, 2010, p. 115).

Los abanicos aluviales son formados a partir de algunos flujos granulares pero en su mayoría por debris flow. Por lo tanto, aquí se muestran algunos de los depósitos de abanicos generados por flujos de escombros, que sirven de base para la interpretación de las secuencias reconocidas dentro de este documento (*Figura 7*):

- \* **Tipo A:** Presentan fábricas desorganizadas con clastos dispersos dentro de una matriz predominantemente arcillosa.
- \* **Tipo B:** Muestran una fábrica clasto soportada con una matriz de arcilla.
- \* **Tipo C:** Depósitos estratificados, con un nivel superior donde los clastos quedan suspendidos dentro de la matriz.



*Figura 7.* Gráfico donde se muestran tres tipos de depósitos cohesivos: A: Depósito masivo con fábrica matriz-soportada, B: Depósito masivo con fábrica clasto soportada; y C: Depósito estratificado con su nivel inferior de flujo cohesivo, el superior se comporta como un flujo rígido. Obtenido de Lowe (1982, en Arche, 2010).

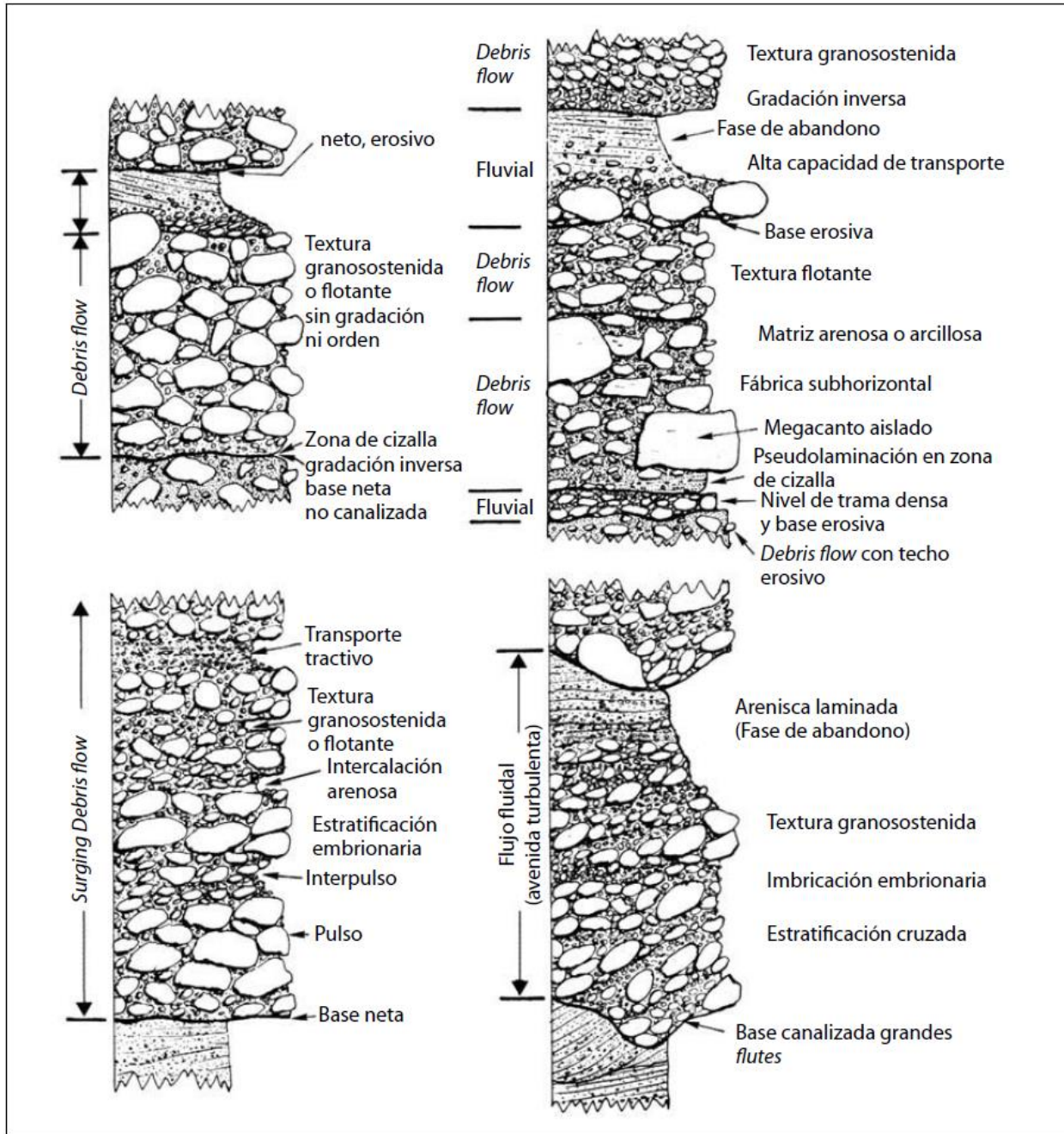


Figura 8. Columnas esquemáticas de las principales características que muestran los debris flow y otras facies asociadas. Obtenido de Nemec y Steel (1984, en Arche, 2010).

**2.1.2. Ríos trenzados.** Se definen como cauces de múltiples canales y baja sinuosidad. Se caracterizan por canales amplios y poco profundos, que durante periodos de aguas bajas se observan múltiples cursos que se ramifican y se reagrupan entorno a barras o islas.

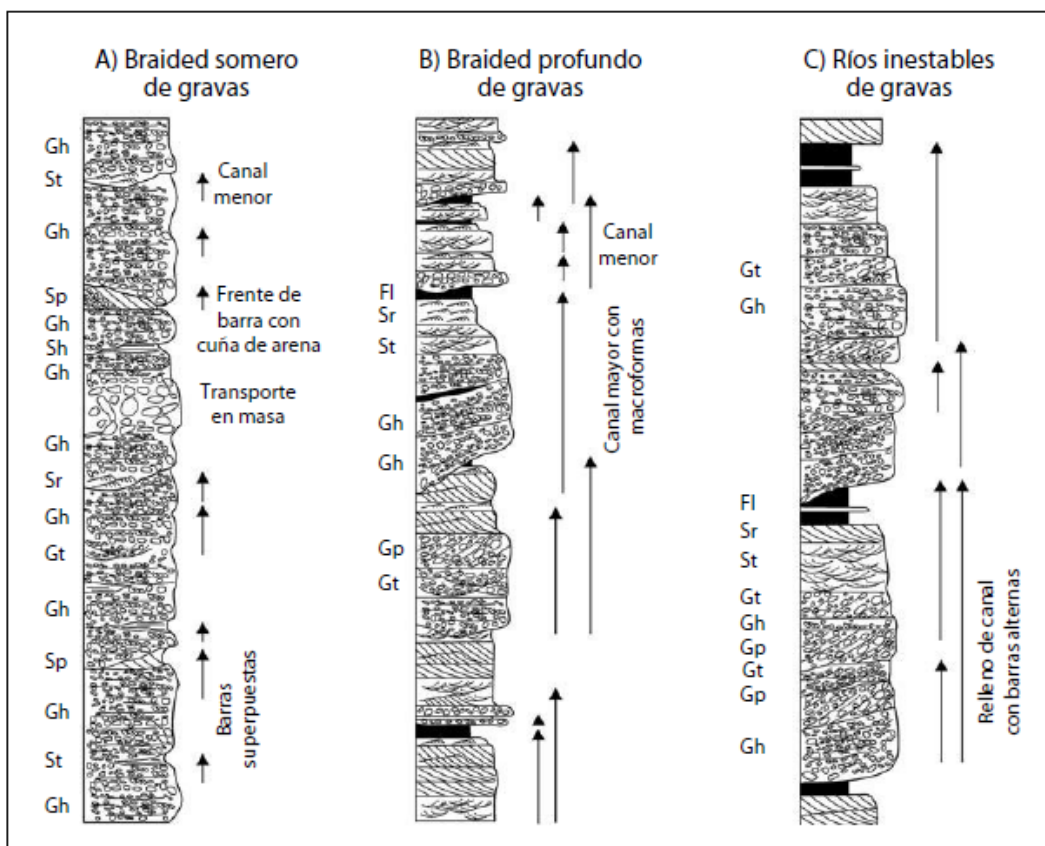
**2.1.2.1. Modelos de sistemas trenzados con predominio de gravas (*shallow gravel braided*).**

Para este tipo de ríos, Miall (1977) presenta una clasificación con tres tipos, según sus características de sinuosidad, entrelazamiento, depósitos generados y a partir de ello su arquitectura facial general.

**A) Sistemas someros:** Estos ríos se caracterizan por canales de baja sinuosidad, con un alto índice de entrelazamiento, en donde predominan las barras unitarias, medias o longitudinales. La sucesión vertical de litofacies que da lugar este sistema (*Figura 12 A*), se caracteriza por cuerpos tabulares de gravas con estratificación horizontal, en menor proporción estratificación cruzada en surcos y ocasionalmente planar. La secuencia presenta numerosas superficies internas de erosión y de forma ocasional niveles de arenas con estratificación horizontal, planar, ripples o laminación paralela.

**B) Sistemas profundos:** Presentan una sinuosidad de baja a moderada, un índice de entrelazamiento de alto a moderado, un predominio de las gravas y un pequeño volumen de finos. Se distingue a este tipo de río del anterior es que la profundidad de sus canales y el tamaño, estabilidad y complejidad de las barras que se desarrollan es mayor. La secuencia vertical (*Figura 12 B*) presenta barras de gravas compuestas. Otros elementos arquitecturales que aparecen son las gravas con estratificación cruzada planar, de surcos y formas arenosas con estratificación cruzada de surco. En este tipo de sistemas se reconocen canales mayores, barras, canales menores que cortan a las barras y llanura de inundación.

**C) Sistemas inestables:** Describe un modelo de sistema de gravas con propiedades intermedias entre los entrelazados y los meandriformes clásicos (*Figura 12 C*), se caracteriza por presentar simultáneamente tramos de alta sinuosidad, rectos y de baja sinuosidad, con un índice de entrelazamiento es desde bajo a moderado. Sus facies son similares a las de los ríos entrelazados profundos que transportan gravas y a los meandriformes de gravas (*Figura 9*). La principal característica distintiva son las superficies de acreción lateral.



*Figura 9.* Columnas esquemáticas de las principales secuencias de sistemas entrelazados con predominio de gravas. Las flechas verticales marcan secuencias granodecrecientes y estratodecrecientes. Obtenido de Miall (1999, en Arche, 2010).

**2.1.2.2. Modelos de sistemas trenzados de arenas.** Miall (1999) reconoce cinco modelos diferentes de ríos entrelazados que transportan preferentemente carga arenosa. Tres de ellos son de

cursos perennes. Los otros dos son sistemas con alta variabilidad en el caudal y tienen carácter efímero (Arche, 2010). A continuación se describen los principales sistemas.

**A) Sistemas de baja sinuosidad con barras alternas:** Es el equivalente arenoso del modelo inestable de gravas, pero con el desarrollo de barras alternas. Presenta un solo cana principal de baja sinuosidad y un índice de entrelazamiento bajo (*¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. A*). Sus facies se caracterizan por arenas con estratificación cruzada planar, estratificación cruzada de surco de manera ocasional y por *ripples* (*Figura 10 A*).

**B) Sistemas trenzados perennes someros:** Se caracteriza por una sinuosidad de baja a moderada y su índice de entrelazamiento es alto (*¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. B*). Las formas principales que componen la arquitectura estratigráfica son las barras arenosas formadas por superposición de estratificación cruzada en apariencia planar (*Figura 10 B*).

**C) Sistemas trenzados perennes profundos:** En este caso el índice de entrelazamiento es de alto a moderado y predominan las barras arenosas compuestas, es decir, formas complejas con un avance frontal pero en las que pueden producirse crecimientos laterales (*¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. C*). Presentan secuencias verticales con una mayor variedad de facies que en los sistemas anteriores. Son frecuentes las estratificaciones cruzadas de surco que pueden confundirse con estratificación cruzada planar en afloramientos (*Figura 10 C*).

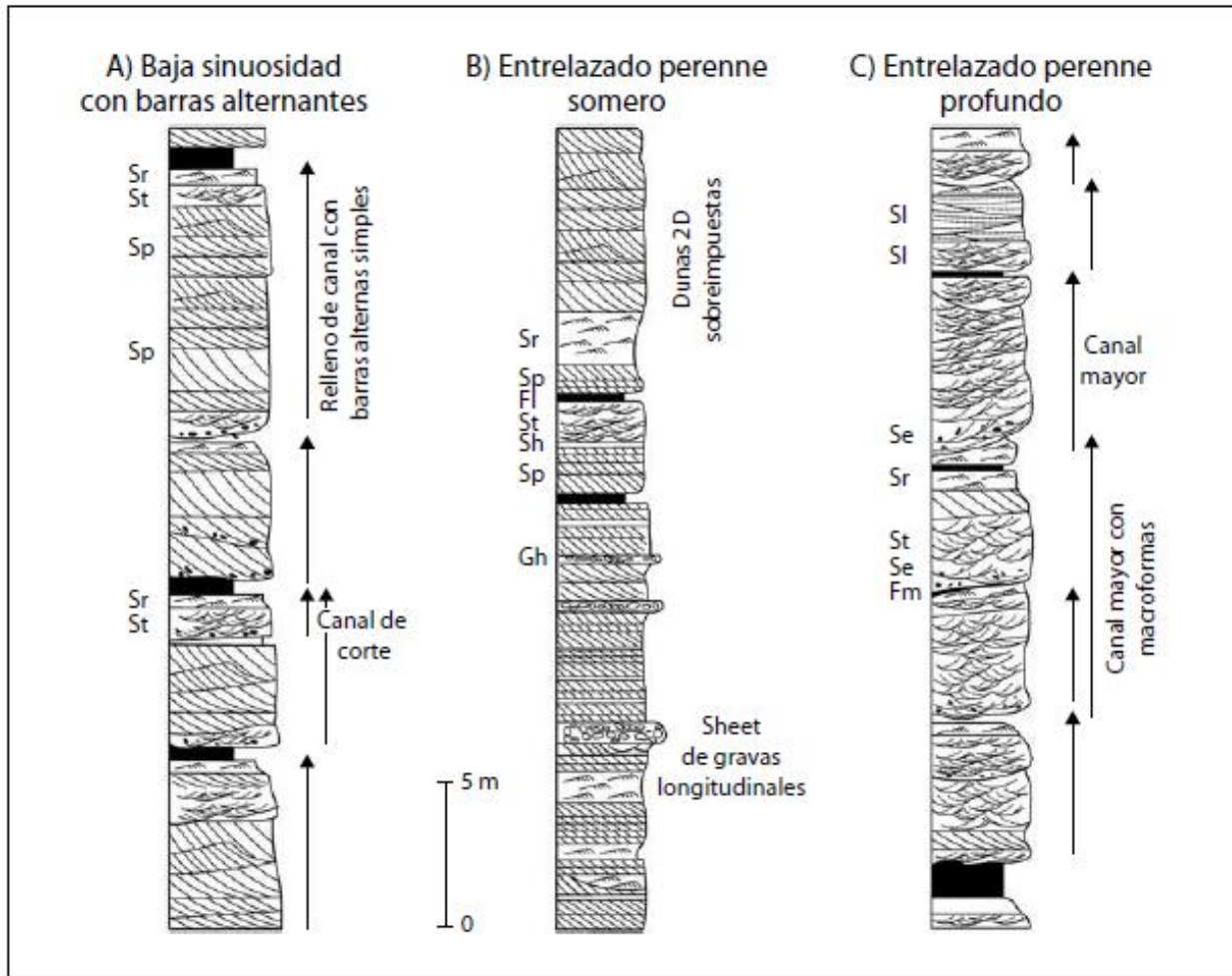


Figura 10. Columnas esquemáticas de las principales secuencias de sistemas entrelazados con predominio de arenas. Las flechas verticales marcan secuencias granodecrecientes y estratodecrecientes. Obtenido de Miall (1999, en Arche, 2010).

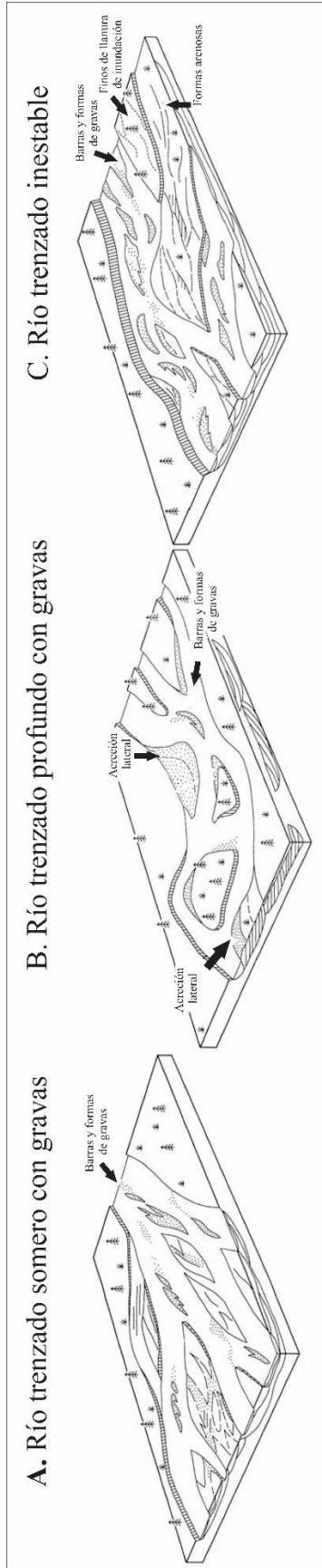


Figura 12. Modelos de los ríos entrelazados que presentan predominio de gravas. Obtenido de Miall (1999, en Arche, 2010).

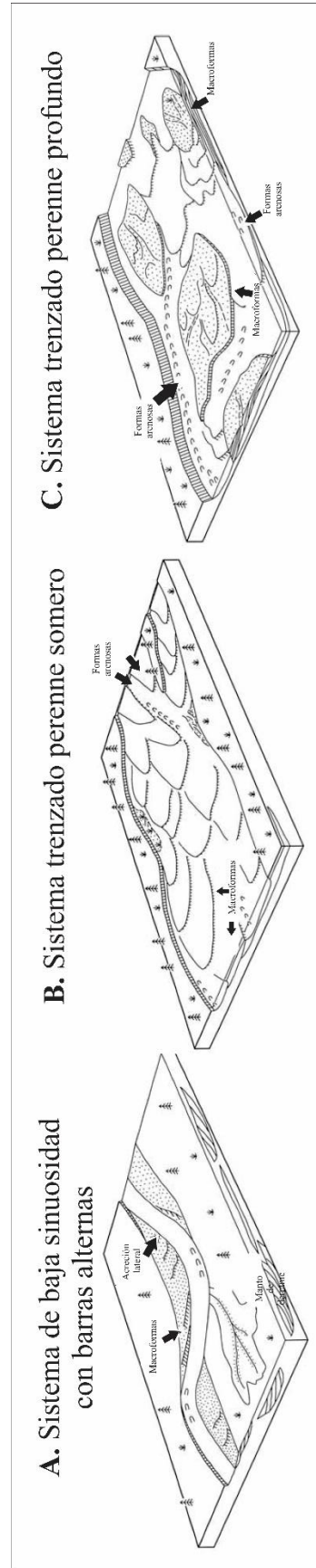


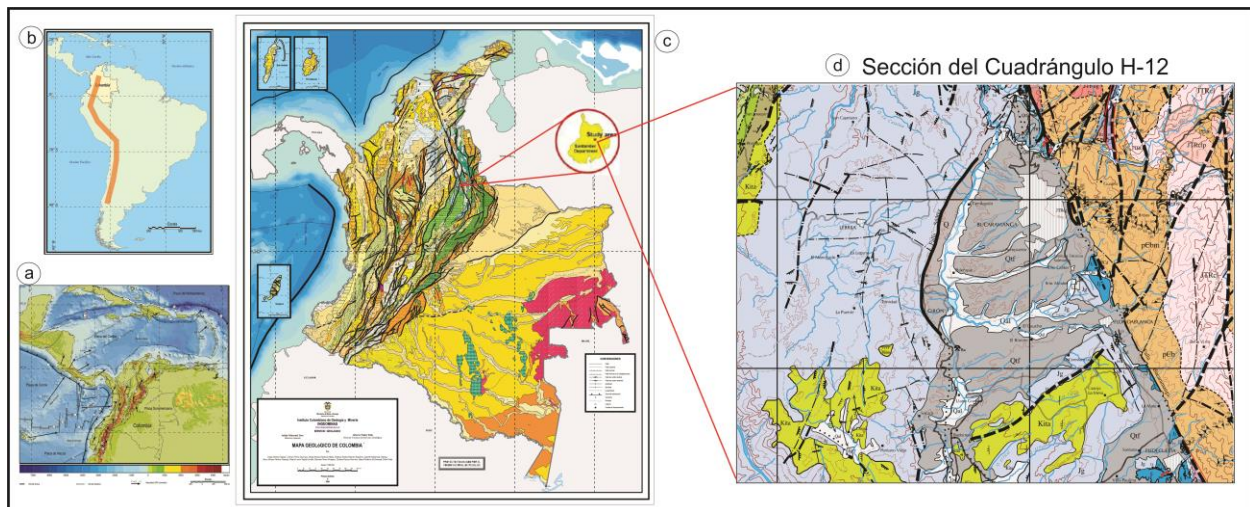
Figura 11. Modelos de los ríos entrelazados que presentan predominio de arenas. Obtenido de Miall (1999, en Arche, 2010).

### 3. Marco Geológico

#### 3.1. Marco Geológico Regional

En esta sección se presenta de manera general la geología regional dentro de la que se enmarca la zona de estudio, la cual está ubicada en el contexto tectónico colombiano, con una geodinámica compleja, que es el resultado de la interacción de las placas tectónicas Nazca y Suramericana, las cuales convergen de manera oblicua, generando el sistema montañoso andino, que responde a un margen activo de magmatismo de arco que se extiende a lo largo de Sur América (*Ver Figura 13*).

La Cordillera Oriental de Colombia contiene basamentos cristalinos con rocas de edad Precámbrica, un ejemplo de ello es el Macizo de Santander (Spikings et al., 2015).



*Figura 13.* Marco geológico regional que alberga al área de estudio, donde se observa: a) Confluencia de las placas tectónicas Nazca y Suramericana, b) La Cordillera de los Andes, c) Mapa geológico de Colombia (2015), que incluye la Cordillera Oriental con el Macizo de Santander, d) Zona de estudio mostrada en una sección del mapa Geológico del Cuadrángulo H-12.

### **3.1.1. Cordillera Oriental – Macizo De Santander.**

**3.1.1.1. Geología Regional.** En este capítulo, se describen las características geológicas del área de estudio y la estratigrafía de las unidades que han sido reportadas como áreas fuente para el depósito sedimentario.

El área metropolitana de Bucaramanga se encuentra en el centro de una depresión tectónica de un grupo de bloques correspondientes a la denominada región de mesas (Julivert, 1959), la cual se divide en tres zonas: occidental, central y oriental, separadas entre ellas por los sistemas de fallas Suárez y Bucaramanga (*Ver Figura 14*).

**Zona Occidental:** La morfología característica de esta zona son escarpes bruscos, colinas y cerros aislados, hacia la parte noroccidental afloran rocas Triásicas de la Formación Bocas y en el resto del área predominan rocas del Jurásico correspondientes a la Formación Girón (Ingeominas, 2005).

**Zona Central:** En esta zona se ubica el área de interés, corresponde a una depresión que fue rellena por depósitos aluviales del Cuaternario que constituyen la Formación Bucaramanga y los abanicos sobre los que se ubican los municipios de Floridablanca y Piedecuesta. Además, se depositaron flujos de escombros provenientes de la zona oriental, terrazas aluviales altas, medias y bajas, también llanuras aluviales asociadas a los ríos de Oro y Frío (Ingeominas, 2005).

**Zona Oriental:** Constituida por rocas ígneas y metamórficas, con edades del Precámbrico al Jurásico. Las unidades más antiguas se agrupan dentro del Complejo Bucaramanga con edad Precámbrico y la Formación Silgará del Paleozoico. Además, una serie de stocks de composición ácida de edades Jurásico y Triásico afloran en el Macizo de Santander, el cual se encuentra limitado al oriente por el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta. Por último, en la zona noroccidente afloran las formaciones Diamante y Tiburón (Ingeominas, 2005).

Cada unidad mencionada en este apartado es descrita a continuación, en el apartado estratigrafía de las posibles áreas fuente.

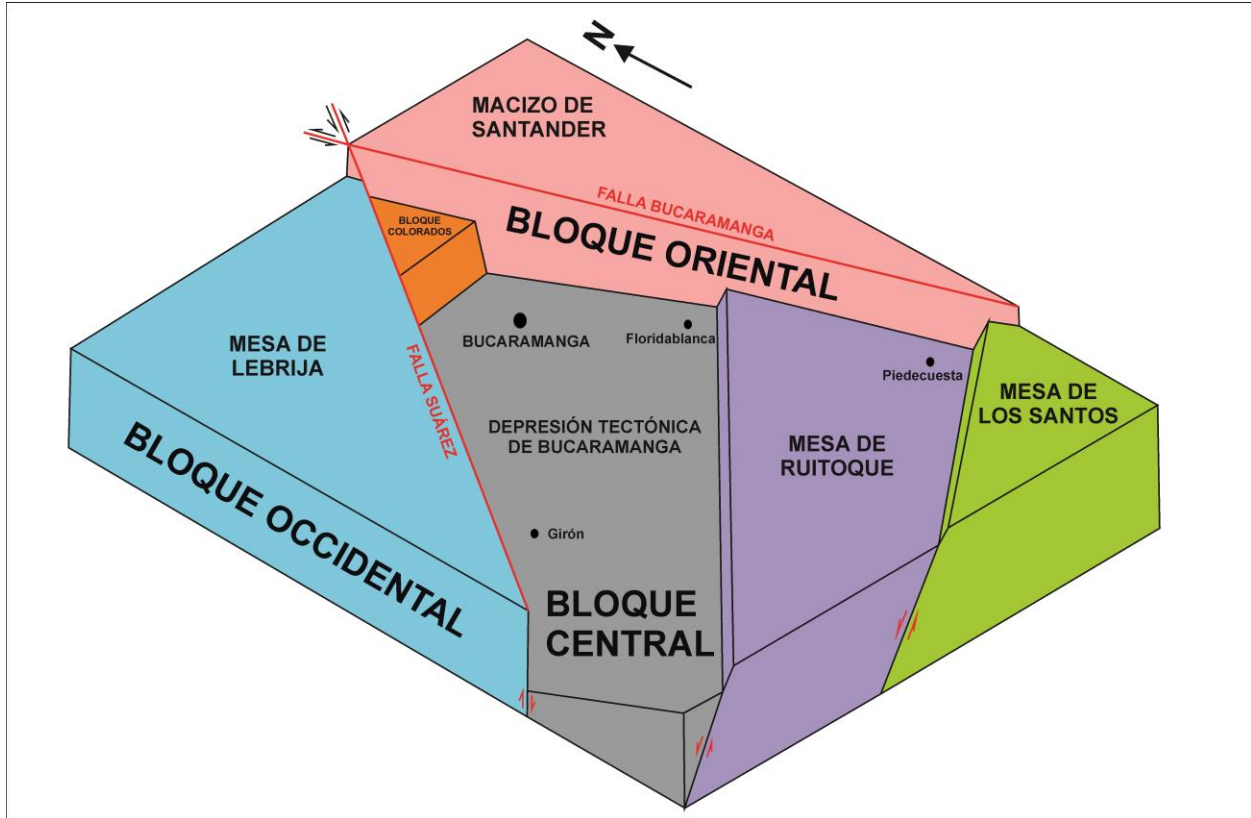


Figura 14. Bloque diagrama que muestra las tres zonas morfológicas en las que se dividió regionalmente la zona de estudio. Tomado y modificado de Niño & Vargas (1992).

**3.1.1.2. Estratigrafía de las posibles áreas fuente.** En la siguiente tabla se realiza una breve descripción de las unidades que podrían considerarse fuente para el sedimento que conforma la Fm. Bucaramanga, especificando las zonas geográficas donde éstos afloran, teniendo como referencia las áreas de drenaje de las cuencas que se proponen para el transporte de dichos sedimentos, como lo son las cuencas de los Ríos Sogamoso, Chicamocha y Suratá.

Tabla 1

*Descripción de las unidades litoestratigráficas que se encuentran como posible fuente del sedimento para la Fm Bucaramanga*

UNIDADES LITO-ESTRATIGRAFICAS	DESCRIPCIONES LITOLÓGICAS	ZONAS Y CUENCAS DONDE AFLORA
Complejo de Bucaramanga	Compuesto por Paranaís, meta-pelítico, semi-pelítico (cuarzofeldespático, hornbléndico, micáceo y granífero) meta-areniscas intercaladas con capas delgadas locales de rocas calcáreas y mármol (Ward et al., 1973), cantidades subordinadas de anfíbolitas, magnéticas, cuarzos y granitas (Royer y Clavijo, 2001).	<b>Localidad tipo:</b> Cerro la Judía y Morro Negro, al este de Bucaramanga, Macizo de Santander (Ward et al., 1973). <b>Cuencas:</b> Río Frio, del Hato y de Oro. Río Suratá. Río Chicamocha
Ortonés	Esta unidad se compone principalmente de gneises cuarzofeldespáticos, localmente hornbléndicos; y algunos cuerpos lenticulares de anfíbolitas (Mantilla et al., 2016 b). El meta-cuarzo feldespático va en composición desde granito a tonalita y diorita, predominan, sin embargo, la cuarzomonzonita y la granodiorita (Ward et al., 1973).	<b>Cuencas:</b> Río Frio, del Hato y de Oro. Río Suratá. Río Chicamocha
Esquistos del Sligará	Secuencia de rocas elásticas metamorfosadas, típicamente delgada y cíclicamente estratificadas de manera cónica, consta de pizarra, filita, meta-limolita, meta-arenisca impura, meta-waca y meta-arcilla guajirana con pocas cantidades de pizarra y filita calcárea (Ward et al., 1973), cuarzos y esquistos (Royer y Clavijo, 2001).	<b>Faja Pledeocuesta - Cacihiri:</b> localidad tipo Quebrada la Sligará. <b>Faja Pamplona - Chitagá:</b> esquistos silíceos con menor cantidad de cuarcita. <b>Área Berfín-Silos-Mutiscua:</b> presencia de estratos carbonatados (Ward et al., 1973). <b>Cuencas:</b> Río Suratá
Esquistos del Chicamocha	Metasandías que constan de cuarzo, plagioclasa, microclina, cantidades variables y subordinadas de moscovita, biotita y granate como minerales principales; metaquelitas representadas en esquistos con cuarzo, moscovita, biotita, clorita, plagioclasa, granate, andalucita, estaurolita, clanita y sillimanita como minerales principales; metabasitas, que son esquistos anfíbolos y anfíbolitas que ocurren como niveles masivos de forma lenticular o cuerpos intermitentes intercalados hacia la parte media de la unidad con esquistos pelíticos. (Mantilla et al., 2016a).	<b>Faja Piedecuesta - Aratoca:</b> se extiende al Oeste de la falla de Bucaramanga, en el sector de pescadero al Sur de Bucaramanga (Ward et al., 1973). Se caracteriza por la ausencia de metawaca y por el mayor grado de metamorfismo, alcanzando la parte baja de la facies anfíbolita (Mantilla et al., 2016a). <b>Cuencas:</b> Río Chicamocha
Diorita y Tonalita del área del río Suratá	Roca equigranular de grano medio y de color verde grisáceo, compuesta de andesina, cuarzo, biotita, hornblenda como minerales principales, feldespato potásico, estena, apatito, óxido de hierro como minerales accesorios. Clorita y epidoto como minerales secundarios (Ward et al., 1973).	Masa pequeña de diorita y tonalita de casi 3 km de largo expuesta en el río Suratá, al norte de su confluencia con el río Tona (Ward et al., 1973). <b>Cuencas:</b> Río Suratá
Formación Diamante	Consta de una secuencia que presenta una parte basal compuesta por arenisca gris púrpura, de grano fino, medio y localmente de grano grueso a conglomerático; una parte media con lodolita gris oscura e intercalaciones de caliza del mismo color, y hacia la parte superior, se conforma de caliza gris oscura, ligeramente arcillosa con delgadas intercalaciones de arcillolitas y areniscas grises a rojo grisáceas (Royer y Clavijo, 2001).	Aflora a unos pocos km al Norte de Bucaramanga a lo largo de la carretera antigua de la vía Bucaramanga – Rionegro, al lado oriental de la quebrada la Monsa (Ward et al., 1973). <b>Cuencas:</b> Río Suratá
Formación Tiburón	Está subdividida por conglomerados calcáreos, líticos, granosopordados, con fragmentos de guijos y guijarros (2-10 cm) de calizas arenoso-calcárea, de color gris subdecolorado a subangulares y en menor proporción fragmentos de areniscas, cherts y rocas volcánicas, dentro de una matriz arenoso-calcárea, de color gris y de grano fino, provenientes de la infrayacente Formación Diamante (Royer y Clavijo, 2001).	Aflora a lo largo de 2 km del lado Sur del Río Suratá, y parcialmente a lo largo de la carretera Bucaramanga-Santa Marta (Ward et al., 1973). <b>Cuencas:</b> Río Suratá
Granito de Pescadero	Granito leucocrático de color rosado naranja, de grano fino a muy fino, equigranular a ligeramente porfirítico; está compuesto de plagioclasa (albita), ortoclasa, microperlitita y cuarzo en cantidades casi iguales; los accesorios son óxidos de hierro, moscovita, biotita y zircón (Royer y Clavijo, 2001).	Pluton alargado de forma algo irregular que aflora al oeste de la falla de Bucaramanga (Ward et al., 1973). <b>Cuencas:</b> Río Chicamocha
Formación Bocas	Está constituida por una alternancia de limolitas, areniscas y arcillolitas calcáreas, gris verdosas y gris oscuras, limolitas gris verdosas, con nódulos calcáreos, conglomerados gris verdosos y arcillolitas gris oscuras, fosilíferas, limolitas gris verdosas a rojo grisáceas, levemente calcáreas. Hacia la parte superior se encuentran capas delgadas de rocas volcánicas (Royer y Clavijo, 2001).	La sección tipo aflora entre Puente Tierra y Bocas, al norte de la ciudad de Bucaramanga (Ward et al., 1973). <b>Cuencas:</b> Río Sogamoso. Río Suratá. Río Chicamocha
Formación Jordán	Está constituida por areniscas gris verdosas, de grano grueso a ligeramente conglomerática, con estratificación cruzada; intercalados se presentan niveles de arcillolitas gris verdosas. En la parte superior se encuentran intercalaciones de limolitas, color marrón rojizo a rojo grisáceo y areniscas de grano fino en capas medianas. También existen dos capas delgadas de tobas solidadas físicas (Royer y Clavijo, 2001).	La sección tipo está a 1 km al oeste del municipio de Jordán, sobre la pendiente Norte del cañón del Río Chicamocha, al Sur de la ciudad de Bucaramanga (Ward et al., 1973). <b>Cuencas:</b> Río Sogamoso. Río Suratá. Río Chicamocha
Formación Girón	Está compuesta por areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomerático, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, estratificación cruzada, en capas gruesas, con interestratificaciones de limolitas y lodolitas, de color rojo violeta, grisáceo y algunos niveles delgadas de conglomerados con guijos de cuarzo hasta de 4 cm (Royer y Clavijo, 2001) en la parte inferior de los Santos, que afloran en el lado oriental, paralelo a la trayectoria de la Falla de Bucaramanga (Estayo, 1985).	Conjunto grueso de areniscas que está ampliamente expuesto al oeste de Bucaramanga, en inmediaciones del municipio de Girón (Ward et al., 1973). <b>Cuencas:</b> Río Sogamoso. Río Suratá. Río Chicamocha
Formación Los Santos	Se divide en dos niveles: el inferior, cuyo contacto con la Fm Girón es inconforme, compuesto por limolitas y arenisca parda rojiza, en ocasiones conglomeráticas que en algunos sitios son de fragmentos angulares de arenisca conglomerática y conglomerados de la Fm Girón; el superior compuesto por arenisca cuarzosa clara, en capas de geometría tabular (Fm Tambor en Ward et al., 1973).	Su sección tipo se ubica en el valle del río Lebrija, aflora al tope de la Fm Girón. <b>Cuencas:</b> Río Frio, del Hato y de Oro. Río Suratá. Río Chicamocha
Formación Tibú-Mercedes	Está constituida por una alternancia de calizas biocálcicas, gris oscuras, localmente arenosas y arcillosas, lodolitas y areniscas gris oscuras, fosilíferas, micáceas. Hacia la parte inferior se encuentran areniscas de grano medio a conglomeráticas, levemente calcáreas, micáceas e interpuestas por capas de lodolitas grises, con nódulos ferruginosos (Royer y Clavijo, 2001).	Aflora al Suroeste de Pamplona, Macizo de Santander (Ward et al., 1973). <b>Cuencas:</b> Río Chicamocha
Formación Aguardiente	Consta de areniscas de cuarzo, grises a gris clara, de grano fino, medio y grueso, glauconíticas, con estratificación cruzada e intercalaciones delgadas de lodolitas grises a negras, carbonosas y micáceas (Royer y Clavijo, 2001).	Aflora en el extremo oriental de Santander (Royer y Clavijo, 2001), a lo largo de la carretera Bucaramanga-Cúcuta, al este de Pamplona (Ward et al., 1973). <b>Cuencas:</b> Río Chicamocha
Formación La Luna	Está constituida por calizas gris oscuras, arcillosas, lutitas grises a negras, calcáreas, en capas delgadas, lutitas gris oscuras con delgadas intercalaciones de calizas arcillosas, concreciones de calizas con fósiles, que alcanzan más de dos metros de diámetro y capas delgadas de chert negro y también capas fosfáticas hacia la parte superior (Royer y Clavijo, 2001).	Aflora en el sector oriental de Santander, compuesta por calizas y lodolitas calcáreas con grandes concreciones y nódulos discoidales, biocálcicos, capas delgadas de chert y rocas fosfáticas en la parte alta de la secuencia (Royer y Clavijo, 2001). <b>Cuencas:</b> Río Chicamocha. Río Suratá

**Nota.** Resumen de las principales unidades litoestratigráficas que afloran en el área de las cuencas de drenaje de los afluentes a los cuales se les atribuye el transporte de los sedimentos de la Fm Bucaramanga. Tomado de (Ward et al., 1973; Royero & Clavijo, 2001; Mantilla et al., 2016a).

### 3.2. Marco Geológico Local

**3.2.1. Estratigrafía.** En esta sección se presenta una recopilación de descripciones sedimentológicas de las litologías presentes en el área de estudio; además, de las diferentes interpretaciones que algunos autores han realizado acerca de su génesis y ambiente de depositación.

**3.2.1.1. Formación Bucaramanga.** Se denomina Formación Bucaramanga a los elementos que componen el depósito cuaternario, que por su morfología se clasifica como un abanico aluvial y que se acumuló en una cuenca tectónica entre dos sistemas de fallas: Bucaramanga y Suárez (Diederix et al., 2008). De acuerdo con Ingeominas (2001), la parte más antigua de la Formación Bucaramanga tiene unos 730.000 años ubicándola dentro del Pleistoceno medio-superior, según dataciones paleomagnéticas publicadas en el proyecto hidroeléctrico Fonce-Suárez, con un espesor estimado entre 250 y 300 m. (Ingeominas, 2001, p. 20).

Dichos elementos fueron clasificados de manera diferente por distintos autores (*Ver Tabla 2*), en primer lugar, Hubach (1952) plantea la interpretación geológica de la erosión y los deslizamientos en Bucaramanga, documento en el cual describe las unidades que conforman la meseta de Bucaramanga, dividiéndolas principalmente en dos grupos: el primero, Formación Bucaramanga, que constituye el subsuelo de la meseta y la ciudad; el segundo lo denominó Formación Órganos, que forma faldas y se reconoce porque es fácilmente erosionable en forma de conos.

De Porta (1959) describe la Terraza de Bucaramanga, realizando una primera clasificación de la denominada Formación Bucaramanga, donde se distinguen tres niveles: el inferior, formado por una alternancia de cantos bien rodados y arenas, que presenta una erosión característica en forma

de pirámides; un nivel medio, formado por materiales muy finos y bien estratificados, que se pueden seguir a lo largo de toda la terraza y el superior, que es más complejo y variado, presenta un régimen aluvial con cantos rodados que termina con los aportes laterales de derrubios de pendiente.

Julivert (1963) divide los depósitos cuaternarios en tres partes: la primera, denominada terraza de Bucaramanga, donde se reconocen tres niveles, el inferior de unos 200 a 250 metros (m) de espesor compuesto de cantos, el nivel medio de 15 m de espesor, formado por limos, arenas finas y arcillas, y el superior con un promedio de 10 m de espesor, compuesto de cantos. La segunda parte corresponde a un complejo de limos, cantos y bloques, altamente rubificado; y la tercera, son pequeñas terrazas posteriores que se forman localmente sobre el nivel inferior, suprayacidas por unas turbas cuyo tope es actual.

Niño & Vargas (1992) proponen el nombre de Formación Meseta de Bucaramanga para los depósitos que componen dicha meseta, dividiéndola en cinco miembros: Calcáreo, Órganos, Finos de Bucaramanga, Gravoso y Limos Rojos; además, propone un medio de depósito de abanico de tipo húmedo y un modelo de evolución geológica, en el cual muestran las fases tectónicas de la cuenca y los procesos de sedimentación del material cuaternario.

Diederix et al. (2008) plantea un espesor de 250 m para la Fm. Bucaramanga, medido desde el escarpe de la Falla Bucaramanga a una altura de aprox. 1000 m, donde el Abanico desciende hacia el occidente a un nivel de 750 m en su parte distal, terminando contra las rocas de la Formación Girón (Jurásico) en el Escarpe de Palonegro/Cantalta, controlado por la Falla Suárez (Diederix et al., 2008, p. 29).

**3.1.1. Estructural - Tectónica local.** En esta sección se presenta una descripción del control tectónico presente en el área de estudio, y las diferentes interpretaciones que otros autores han realizado acerca de su influencia, tanto en la depositación de la Formación Bucaramanga como en la deformación reciente (neotectónica).

La terraza de Bucaramanga se encuentra en un marco estructural complejo y definido de manera general por dos fallas principales, al oriente de la ciudad y colocando en contacto con el macizo de Santander está un segmento de la Falla Bucaramanga-Santa Marta y hacia el occidente la Falla del Suárez, las dos convergen en un ángulo aproximado de  $35^\circ$  al norte de la ciudad de Bucaramanga (Diederix et al., 2008). Con base en el análisis de tensores y geología regional, Velandia (2017) soporta un modelo con datos sobre la transcurrancia sinistral de la Falla de Bucaramanga, configurando una estructura en flor simétrica positiva, con las fallas de Guamalito al E y Lebrija al W.

Julivert (1958), realiza un estudio de Morfoestructuras al SW de Bucaramanga, en el cual define la zona de las Mesas como una estructura tabular rota o cortada por flexiones, comprendida entre el Valle del Magdalena y el Macizo de Santander, limitada al oriente por la falla de Bucaramanga y al occidente por la flexión de Chucurí.

Carrillo y Vergara (2002), proponen que los mejores, más abundantes y variados rasgos de neotectónica en la zona, están asociados a la falla de Bucaramanga (y sus fallas satélites), los cuales están presentes por 110 kilómetros (km) (de los 220 km de longitud total de la falla), entre Curos y San Alberto, incluso encontraron indicios de neotectónica en el área metropolitana, donde se observan varios afloramientos en los cuales los depósitos del Abanico-Terraza de Bucaramanga se presentan cabalgados por rocas más antiguas, evidencia de actividad Cuaternaria de la Falla de

Bucaramanga. También la falla de Suárez y sus fallas satélites subparalelas de corta longitud, entre las que se menciona la falla del río de Oro, presentan rasgos de Neotectónica; allí se destaca un afloramiento sobre un carreteable veredal, 3 km al suroccidente de Girón, donde areniscas Jurásicas de la Formación Girón están cabalgando sobre un depósito de grava del Cuaternario, constituyéndose en evidencia de neotectónica (Carrillo y Vergara, 2002, p. 6).

**3.1.1.2. Falla Bucaramanga.** Carrillo y Vergara (2002), describen la Falla de Bucaramanga con comportamiento lateral izquierdo, componente inversa y vergencia al suroccidente, extensión de 220 km, dentro de la caracterización realizada por los autores la clasifican como una falla activa de actividad moderada y un desplazamiento entre 0,1 a 1 mm/año (Carrillo y Vergara, 2002). De Bucaramanga al sur, la falla presenta un tramo individual de 82 km de longitud, entre Bucaramanga y Ricaute, con complejidad de lomos y valles alargados controlados por trazos Riedel sintéticos (R) y antitéticos (R') que permiten determinar un corredor o zona de daño que varía de 5 a 8 km de ancho; con base en la geometría de las fallas menores tipo Riedel se determina una orientación del esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_1$ ) con un azimut que varía entre  $105^\circ$  y  $140^\circ$  (Velandia, 2017, p. 149).

Como evidencias de actividad neotectónica se encuentran afloramientos dentro del área metropolitana de Bucaramanga en donde unidades Jurásicas cabalgan sobre los depósitos del abanico y las tasas de deslizamiento actuales (de 0,01 a 10 mm/año) se han propuesto hasta ahora para la falla de Bucaramanga (Jiménez et al., 2015).

**3.1.1.3. Falla Suárez.** Carrillo y Vergara (2002) describen la Falla de Suárez como inversa con una componente leve sinistral, su extensión es de aproximadamente 160 km, presentando una trayectoria irregular con una orientación promedio de N20°E. Es clasificada como una falla activa con una baja tasa de desplazamiento (0.01 – 1 mm/año). Según (Julivert, 1963) esta estructura tuvo

actividad simultánea o incluso posterior a la depositación del cuaternario. La dirección de la falla está alineada con el curso del río Sogamoso hasta la flexura que se presenta en la zona de mesas donde cruza el cauce en ángulo recto (Ward et al., 1973).

Esta falla tiene una longitud de 110 km medida desde el pueblo de la Paz Santander (al sur) hasta la vereda El Vijagual, municipio de Rionegro (Santander), es considerada como una falla activa cuaternaria con un comportamiento inverso sinextral (Ingeominas, 2008).

## **4. Resultados**

### **4.1. Análisis sedimentológico y estratigráfico de la Formación Bucaramanga**

En estudios previos realizados para la Fm. Bucaramanga se ha optado por dividirla en cinco segmentos o miembros: Calcáreo o Pre-Órganos, Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos (Niño & Vargas, 1992; Arévalo & Rincón, 2016). Otros autores como Bueno & Solarte (1994), Ingeominas (2001), Lima & Medina (2015) y Franco & Ramírez (2018) plantearon sólo cuatro miembros o segmentos debido a la ausencia del segmento Calcáreo o Miembro Pre-Órganos en sus zonas de estudio, para ellos su distribución no es uniforme ni persistente en toda la extensión del abanico, por lo cual consideran que hace parte del Miembro Órganos.

Teniendo en cuenta las observaciones del denominado Miembro Pre-Órganos realizadas por Arévalo & Rincón (2016), se optó por dividir la Fm. Bucaramanga en cinco miembros: Pre-Órganos, Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos, de acuerdo con la propuesta de Garnica & Niño (2015) y Arévalo & Rincón (2016). A continuación, se presentan las características reportadas en la literatura para cada uno de ellos en forma de cuadros comparativos, de la Tabla 3 a la Tabla 7.

Tabla 2

*División de la Formación Bucaramanga según diferentes autores*

DIVISIÓN DE LA FORMACIÓN BUCARAMANGA												
AUTORES	Hubach (1952)	De Porta (1959)	Julivert (1963)	Niño & Vargas (1992)	Bueno & Solarte (1994)	Ingeominas (2001)	Lima & Medina (2015)	Garnica & Niño (2015)	Arévalo & Rincón (2016)	Solano (2016)	Franco & Ramírez (2018)	
DIVISIONES PROPUESTAS	Formación Bucaramanga	Capa de greda ocre	Limos rojos	Segmento Limos rojos	Miembro Limos rojos							
		Capa de conglomerado arcillosa	Nivel superior (Cantos)	Segmento Gravoso	Miembro Gravoso							
			Capa alternada	Nivel medio (arcilla, arenas finas)	Segmento Finos	Miembro Finos						
				Formación Órganos	Nivel inferior (cantos)	Segmento Órganos	Segmento Órganos	Miembro Órganos	Órganos superior	Órganos inferior	Miembro Órganos	Órganos superior
		Nivel inferior	Segmento Calcareo	Segmento Calcareo	Miembro Pre-Órganos							

Nota. Recopilación del estado del arte. Muestra de Base (B) a Techo (T) la manera como a través del tiempo se ha clasificado la Formación Bucaramanga en distintos estudios realizados por diferentes autores, por medio de esta tabla se intentó correlacionar las múltiples unidades propuestas, basados en las características litológicas y sedimentológicas descritas en cada documento.



**4.1.1. Miembro Pre-Órganos.** Fue definido inicialmente como segmento calcáreo por Niño & Vargas (1992) y constituye la base de la Formación Bucaramanga. El segmento aflora sólo en su parte media al norte de la escarpa occidental, en el área no es posible observar ni su base ni su tope. Estudios más recientes han señalado la presencia de paleosuelos y bancos carbonatados, características que lo diferencian del Miembro Órganos (Arévalo & Rincón, 2016, p. 94) (*Ver Tabla 3*).

Ingeominas (2001) propone que este segmento no presenta una continuidad lateral y en cambio se presenta en lentes locales al NW de la ciudad, y que por esta razón debe formar parte del Miembro Órganos. Aunque no se ha llegado a un consenso por falta de afloramientos suficientes, creemos que por las características litológicas descritas por autores anteriores (Niño & Vargas, 1992; Arévalo & Rincón, 2016) se justifica denominar el segmento como el miembro basal de la Formación Bucaramanga.

Tabla 3

*Cuadro comparativo del Miembro Pre-Órganos*

Miembro Pre-Órganos	CARACTERÍSTICAS	Niño & Vargas (1992)	Garnica & Niño (2015)	Arévalo & Rincón (2016)
	Nombre propuesto por el autor	Segmento Calcáreo	Miembro Pre-Órganos	
	Litología/ Sedimentología	Lodos y lodos arenosos compactos, gravas arenosas y arenolodosas redondeadas y de esfericidad media, en capas con geometría tabular.	Capa inferior de medias a finas con laminación plana y ondulosa paralela de continua a discontinua de lodos y lodos arenosos, gravas.	<b>Nivel fino:</b> Arena media y fina a muy fina. <b>Nivel medio:</b> Paleosuelos con materia orgánica, arena gruesa, fina, fina a media y fina a gruesa. <b>Nivel grueso:</b> Dos capas, la primera de material arcillo-limoso y la segunda de arena muy gruesa con grava.
	Espesor	Entre 3 y 7.30 m (aflorando)	Máximo 60 m	21 m
	Zona donde se midió el espesor	Quebrada La Picha y Quebrada Dos Aguas	N.M	Bahondo y altea alta, Girón
	Ubicación dentro del abanico	Parte distal	N.M	Parte distal del abanico
	Ambiente	Facies distal de un abanico dominado por flujo de lodos y depósitos de corriente entre un alto del basamento (Fm. Girón) y el Macizo de Santander.	N..M	Se definen dos eventos: 1. Depositación del abanico aluvial con baja energía. 2. Cambio de energía de baja-media a media-alta.
	Contactos	N.M	N.M	El límite superior se marca por el aumento de energía y la ausencia de canales.
	Composición del sedimento	Fragmentos calcáreos, algunos feldspatos alterados dentro del material gravoso; en la grava predominan clastos ígneos y metamórficos (18%), arenas silíceas (6%), areniscas violetas (6%), cuarzo (5%) y areniscas pardas y verdes (2%).	N.M	Minerales ígneos y metamórficos: Nontronita, producto de alteración de rocas ígneas máficas, tefroita (presente en pizarras), caolinita, zircones; estos minerales son característicos del Macizo de Santander.

Tabla

3Nota.

Recopilación bibliográfica en base a estudios previos realizados en el Miembro Pre.Órganos de la Fm. Bucaramanga. \*(N.M: No mencionado en el documento).

**4.1.2. Miembro Órganos.** Este miembro fue mencionado inicialmente por Hubach (1952) como una formación; sin embargo, posteriormente fue definido como un nivel de la Fm. Bucaramanga por De Porta (1958); es continuo (Niño & Vargas, 1992, p. 58.), siendo el nivel más potente de la Fm. Bucaramanga, con un espesor mayor de 180 m, se caracteriza por erosionarse fácilmente, formando surcos, cárcavas y tierras malas que dan formas de estoraques (Ingeominas, 2001, p. 20) (*Ver Tabla 4*).

El Miembro Órganos descrito por Lima & Medina (2015) en el anillo vial, entre los municipios de Girón y Floridablanca, se asocia con un ambiente de depositación tipo Floodplain, dividido en siete facies sedimentarias, a partir de las cuales determinan siete ciclos paleoclimáticos. El paleoclima está regido por fluctuaciones en el nivel freático y variaciones en las precipitaciones, que van desde estacionales hasta llegar a un período de aridez, seguido de precipitaciones moderadas, que van aumentando progresivamente hasta llegar a ser estacionales; las precipitaciones se vuelven a intensificar llegando a torrenciales, seguido por un flujo de escombros, a partir del cual, las precipitaciones fueron disminuyendo progresivamente (Lima & Medina, 2015, pp. 96-97).

Por otra parte, Garnica & Niño (2015) definen tres eventos de depositación, el primero a la base de baja energía, representado en lodos arenosos; el segundo de media energía por el contenido de arenas y, por último, un evento de alta energía representado en la ocurrencia de conglomerados; mediante el conteo de clastos y análisis de composición de estos relacionó su área fuente con la cuenca de drenaje del río Suratá.

En un trabajo más reciente Contreras y Osma (2018) plantean la división en tres segmentos para el Miembro Órganos: Órganos Inferior (QbO1), Órganos Superior (QbO2) y Órganos removido

(QbO?). Dicha diferenciación se realiza a partir de las diferencias litológicas de los clastos recolectados tanto en afloramientos como en de núcleos de perforación de sondeos suministrados GEO-MÁTICA-UIS (2017). En el segmento Órganos Inferior predomina una composición de clastos ígneo-metamórficos, que en sus características texturales se asocia a un ambiente de depositación aluvial; mientras que en Órganos Superior se destacan los clastos sedimentarios, planteando así un área fuente diferente para estos dos segmentos.

**4.1.3. Miembro Finos.** Esta unidad fue reconocida inicialmente por Hubach (1952), presenta una forma de cuña que se adelgaza hacia el norte y al oriente, mientras que hacia el sur alcanza su máximo espesor (35 m) (Niño & Vargas, 1992, p. 58); según Ingeominas (2001) se puede dividir en dos conjuntos: Arcilloso a la base de espesor variable y Arenoso al tope, donde presenta niveles alternancia de niveles arenolimosos con niveles limoarenosos arcóscicos de colores amarillento a pardo amarillento (Ingeominas, 2001, pp. 22-23) (*Ver Tabla 5*). Litológicamente comprende intercalaciones de capas arcillosas grises, limos arcillosos, arenas lodosas con algunas gravas finas matriz soportadas, predominan los finos. Los clastos en las gravas son gránulos, subangulares a subredondeados, mal calibrados con 11 m de espesor medido al sur de Río Frío (Solano, 2016, p. 65). El ambiente de depositación de este miembro es de depósitos de ambiente aluvial de intercanales poco profundo, de baja energía y de escasas interdigitaciones de flujo de escombros de facies arenosas (Ingeominas, 2001, p. 25).

**4.1.4. Miembro Gravoso.** El segmento Gravoso fue definido por Niño & Vargas (1992) y reconocido en la escarpa occidental y norte de Bucaramanga por Ingeominas (2001, p. 25). Al alterarse forma un suelo naranja sobre el cual se construyó la ciudad, cubriendo la superficie del abanico en su parte proximal y media. En general el depósito es matriz soportado, aunque localmente se presenta clasto soportado (Niño & Vargas, 1992, pp. 53 y 58) (*Ver Tabla 6*).

Las gravas son clasto soportadas de guijas de 5 a 6 cm, algunos guijarros de 15 cm, redondeadas a subredondeadas, mal calibradas con un espesor visible de 2 m, medido al sur de Río Frío (Solano, 2016, p. 65). Las gravas son olimícticos compuestos de clastos de arenitas blancas 69%, arenitas glauconíticas 20%, rocas metamórficas 9%, granitos y riolitas 2% (Franco & Ramírez, 2018, p. 87). Los depósitos que lo conforman presentan un grado de meteorización medio a alto. Los bajos porcentajes de humedad natural ( $W < 15\%$ ), el predominio de partículas tamaño gránulo y el grado de meteorización, sugiere que, al menos la parte superficial, tiene poca compactación y buena permeabilidad. El ambiente de depositación indica un dominio de flujo de escombros (Ingeominas, 2001, p. 25).

Tabla 4

Cuadro comparativo del Miembro Órganos

CARACTERÍSTICAS	Hubach (1952)	De Porta (1959)	Niño & Vargas (1992)	Bueno & Solarte (1994)	Ingeominas (2001)	Garnica & Niño (2015)	Lima & Medina (2015)	Solano (2016)	Franco & Ramírez (2018)
<b>Litología/ Sedimentología</b>	Presenta erosión característica y su constitución es uniforme, de capas de conglomerados mal limitados, sedimentos arenos-arcillosos.	Es el más homogéneo de los niveles, alternancia de bancos conglomerados, arenas bien rodadas y fajas de arenas con un espesor de 1m (aprox.), lo que da lugar a una sucesión de bandas claras y oscuras que se alternan y son fácilmente visibles.	Capas gruesas a muy gruesas, con niveles medios de arcillas compactas arenosas y ligeramente micáceas con trazas de materia orgánica.	Serie monótona de niveles conglomeráticos polimictos en capas de gruesas a muy gruesas (hasta 15m) en alternancia con niveles finos limoarenosos con variaciones laterales y verticales tanto de composición como de textura.	Menciona dos niveles: los de aspecto conglomerático que conforman depósitos de gravas y bloques. Los niveles finos corresponden a arcillas arenosas y arenas arcillosas compactadas.	Se divide en dos miembros a partir de la interpretación de los cambios energéticos en los eventos identificados; el inferior que es más fino, y el superior que es más grueso.	Gravas, clasto soporadas, carbonato pedogénico, arcillas y matriz arenosa; calibradas, variadas, arenas masivas con guijarros, clastos bien interdigitados con capas de guijarros, gravas subredondeadas, matriz espesa variable de arenas a redonda arenolodosa; con capas de arcilla de geometría tabular o matriz portada; arenas lodosas; limos lentilares.	Intercalaciones de capas gravosas clastoportadas y matriz arenosa; arenas lodosas; limos lentilares; arcillosas y arcillas limosas.	Depósitos de gravas de guijarros de moderado a mal seleccionados, muy bien redondeados, arenas clastoportadas, presencia aleatoria de guijarros, clastos bien interdigitados con capas de arenas a redonda arenolodosa; matriz espesa variable de arenas a redonda arenolodosa; con capas de arcilla de geometría tabular o matriz portada; arenas lodosas; limos lentilares.
<b>Edad</b>	Pleistoceno	N.M	N.M	N.M	Podría abarcar el Pleistoceno medio	N.M	N.M	N.M	N.M
<b>Espesor</b>	N.M	200 a 250 m	164.8 m	170 m (aproximado)	Mayor a 180 m	N.M	N.M	136 m	135 m
<b>Zona donde se midió el espesor</b>	N.M	Zona del aeropuerto	Quebrada Dos Aguas	Quebrada Vadivieso y sección entre puente el Bueno y Ciudadela Real de Minas	N.M	N.M	N.M	Municipios de Floridablanca y Girón en límites con el anillo vial	Sector de Rincón de Girón
<b>Contactos</b>	Contacto superior: Miembro Finos.	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	El contacto inferior con la unidad sedimentaria es inconfundible y el contacto superior es gradacional.
<b>Ubicación dentro del abanico</b>	N.M	N.M	Facies proximal	Parte proximal del abanico	Zona proximal y media	Zona media y distal	N.M	N.M	N.M
<b>Facies</b>	N.M	N.M	Gravosa de Miall y Rust (1978).	N.M	N.M	Gsm, Ms, Sm, Gm, Smg.	Siete litofacies: Gm, P, Fr, Sh, Gms, Gcm y Pf	N.M	Grandocreciente: Gc, Sm, Sh, Fm, Fj. Agradacional: Gc, Sm, Sh. Grandocreciente: Sm, Sh.
<b>Ambiente</b>	N.M	N.M	Abanico dominado por corrientes, caracterizado por flujos de escombros fluidos que rellenan canales y forman barras. Los niveles finos corresponden a depósitos intercanales, bajo un régimen litual constante.	Ciclos de deposición de flujos de escombros y de todo en condiciones climáticas extremas, con períodos intermedios de erosión y retrabajamiento.	Se relaciona con flujos de escombros y flujos torrenciales, e interdigitación de facies de corrientes de canal. Los niveles finos se relacionan con depósitos de canales, bajo un régimen litual constante.	Variaciones en el régimen de energía: Abanico aluvial, Fluvial y Fluvial-Playa.	Procesos aluviales y transporte fluvial.	Sistema entrelazado somero de gravas caracterizado por múltiples canales de baja sinuosidad y abandonarse en un escenario de disminución del caudal, dando lugar a depósitos de arenas y material fino en la planicie de inundación.	
<b>Composición del sedimento</b>	N.M	Igneo- Metamórfico (50%), areniscas (25%) y Cretácicas (20%). -Girón (20%).	Areniscas blancas silíceas (30%), igneos y metamórficos (22%), areniscas violetas (8%), cuarzo (5%) y caliza (1%).	Arenas silíceas (40%), cantos igneos y metamórficos (32%), lodolitas y areniscas lodosas (16%), fanerítica, neis micáceo, cuarzo leñoso (6%), loditas y cherts (4%).	Arenas silíceas de grano medio, en menor proporción FR igneos ácidos de textura fanerítica, neis micáceo, areniscas lodosas, loditas y cherts.	Arenisca, arenisca morada, granito, esquisto, cuarzo, delimitando el área fuente en el Macizo de Santander.	N.M	Metamórficas (30%), areniscas blancas (22%), sedimentarias (20%), igneo (16%), areniscas glaucofánicas (8%), sedimentarias blancas finas (5%), chert (4%) y cuarzo (3%).	
<b>Unidad fuente del sedimento</b>	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	Fm. Los Santos, Fm. Girón, Grupo plutónico de Santander, Fm. Silgará, Complejo de Bucaramanga.	N.M	Fm. Tambor, Fm. La Luna, Fm. Aguardiente.	N.M

Nota. Recopilación bibliográfica en base a estudios previos realizados en el Miembro Órganos de la Fm. Bucaramanga. \*(N.M: No mencionado en el documento)

Tabla 5

Cuadro comparativo del Miembro Finos

Miembro Finos							
CARACTERÍSTICAS	Hubach (1952)	De Porta (1959)	Niño & Vargas (1992)	Bueno & Solarte (1994)	Ingeominas (2001)	Solano (2016)	Franco & Ramírez (2018)
<b>Litología/Sedimentología</b>	Cintas delgadas consolidadas de arcilla y estratificadas, que se arcilla arenosa, en estratificación regular, en estratos de espesores de 1 a 2 centímetros a un metro de espesor, alternado con conglomerados.	Materiales muy finos, bien estratificados, que se pueden seguir a lo largo de la terraza constituyendo un buen nivel guía.	Capas finas de arenas arcillosas, arcillas arenosas ligeramente micáceas, gravas y algunas gravas arcillosas. Presencia de paleosuelos, hard grounds y óxidos de hierro en lentes.	<b>Dos conjuntos:</b> Base: Predominantemente arcilloso masivo sin estructuras internas y espesor variable. Techo: Alternancia de niveles arenolimosos con niveles limoarenosos arcócosos.	Capa lenticular horizontal donde alternan niveles arcillosos grises, limos arcillosos y limoarenosos y arenolimosos de colores gris verdosos y geometría tabular a lenticular con espesores de 5 a 40 cm. son granulos, subangulares a subredondeados, mal paralela cruzada y ondulosa.	Intercalaciones de capas arcillosas grises, limos arcillosos y limoarenosos y algunas gravas finas matizadas, predominan los granolitos de variable granulometría variable, además de niveles de poco espesor de lodos, arcillas y gravas.	<b>Cuatro niveles:</b> niveles con gradación normal y en menor proporción agradaciones de arenas feldespáticas de granulometría variable, además de niveles de poco espesor de lodos, arcillas y gravas.
<b>Espesor</b>	7 m	8 a 10 m	Variable, máximo de 19 m	14 m en promedio acunándose al norte	15 m en promedio	11 m	Varía de 13 a 31 m
<b>Zona donde se midió el espesor</b>	N.M	Zona del aeropuerto	Barrio Don Bosco	Parte superior de los escarpes de la Meseta	N.M	Vereda Llanadas, Girón	Ladillera Baulista Cáceres
<b>Contactos</b>	<b>Inferior:</b> Miembro Organos <b>Superior:</b> Miembro Gravoso	N.M	N.M	N.M	Contacto inferior y superior de tipo netos plano-paralelos.	N.M	Contacto inferior de tipo agradacional. Contacto superior de tipo erosivo.
<b>Facies</b>	N.M	N.M	Arenosa de Miall y Rust 1978	N.M	N.M	N.M	<b>Granodreciente:</b> Gc, Sm, Sh, Fm, Fl. <b>Agradacional:</b> Sm. <b>Granocreciente y estratocreciente:</b> Fl, St, Sm, Gc.
<b>Ambiente</b>	N.M	Régimen de aguas tranquilas similar al observado en la parte baja del Río Magdalena, régimen de cenagas. Ambiente fluvio-lagunar.	Depósitos de corrientes permanentes y migratorias de canales trenzados con esporádicos flujos de lodos y escombros de baja intensidad.	Sub-ambientes lagunares seguidos de depósitos de corrientes permanentes y migratorias de canales trenzados, con alternancia de períodos con lluvias torrenciales, que generaron deposición rápida y otros períodos lluviosos de menor intensidad pero más constantes.	Depósitos de ambiente aluvial de intercanales poco profundo, de baja energía y de escasas interdigitaciones de flujos de escombros de facies arenosas.	Fluvial	Río trenzado distal dominado por arenas con escorrentía efímera y canales someros y mal definidos.
<b>Origen del sedimento</b>	N.M	N.M	Generados a partir del punto de intersección del abanico.	N.M	N.M	N.M	N.M

Nota. Recopilación bibliográfica en base a estudios previos realizados en el Miembro Finos de la Fm. Bucaramanga. \*(N.M: No mencionado en el documento).

Tabla 6

Cuadro comparativo del Miembro Gravoso

Miembro Gravoso							
CARACTERÍSTICAS	Hubach (1952)	De Porta (1959)	Niño & Vargas (1992)	Bueno & Solarte (1994)	Ingeominas (2001)	Solano (2016)	Franco & Ramirez (2016)
Litología/ Sedimentología	Capas de conglomerados de tamaño variable, cementados por una matriz arenó-arcillosa permeable.	Camios rotados, termina con aportes laterales y derrumbios de pendiente, observados desde Bucaramanga y las estribaciones de la plataforma de Lebrija desde Girón a Chocó.	Nivel grueso de gravas arenolodasas y lodarenosa subredondeada, de estereidad media y mal calibradas, sin estructuras internas; los cantos en su mayoría son tamaño grava de diámetro promedio 15 cm y bloques de roca en menor proporción con diámetros de hasta 0.8 m, subangulares a subredondeados, en matriz arenó-arcilla-limosa, color pardo rojizo, rojizo y ocre pálido.	Niveles gravosos, gravo-arenosos y arenogravosos con cantos subangulares y subredondeados, soportados en una matriz arenó-arcillosa. Pueden aparecer gravas alineadas dentro de los niveles arenosos.	Gravas que a nivel macroscópico se estiman con una matriz del 60%, del volumen total, con aproximadamente 2/3 partes de arena tamaño medio a grueso y 1/3 de finos.	Gravas clasosportadas de guijas de 5 a 6 cm, algunos guijarros de 15 cm, seleccionadas, clasto-rendeadas y mal calibradas.	Intercalaciones de gravas, guijas y gujarros mal seleccionadas, clasto-rendeadas y mal calibradas. Presenta alto nivel de oxidación.
Contactos	Inferior: Miembro Finos Superior: Miembro Limas Rojos	N.M	Contacto inferior: neto, continuo y suavemente onduloso.	Contacto inferior irregular	Contacto superior agradacional	N.M	Contacto superior erosivo
Espesor	18 m	Variable	Variable, máximo 8 m	Variable (10 m en promedio)	N.M	2 m (aflojando)	5.5 m
Zona donde se midió el espesor	Zona occidental	Zona del aeropuerto	Escarpa occidental (barrio Don Bosco) y norte de la ciudad (Café Madrid).	Borde del escairpe de la meseta	N.M	Vereda Llanadas, Girón	Zona de ladrilleras (Barrio El Porvenir)
Facies	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	Grandecreciente: Gc, Sm, Sh, Fm. Agradacional: Gc.
Ambiente	N.M	Régimen fluvial	Flujo de todo y escorbos viscosos	Deposición condicionada a la paleo-topografía erosiva existente.	N.M	Fluvial	Sistema entrelazado somero de gravas caracterizado por múltiples canales de baja sinuosidad y profundidad, los cuales pueden abandonarse en un escenario de disminución del caudal, dando lugar a depósitos de arenas y material fino.
Composición del sedimento	N.M	Areniscas cretácicas (75%) Granto (10%) Fm Girón (5%)	Areniscas blancas silíceas (45%) Areniscas violetas (15%) Igneos y metamórficos (10%)	Areniscas blancas silíceas no cementadas (55%) Areniscas violetas (20%) Igneos y metamórficos (17%) Cuarzosas, limosas y limolitas moradas.	Compuesto en su mayoría por rocas metamórficas-igneas y areniscas cuarzosas, limosas y limolitas moradas.	N.M	Arenitas blancas (69%) Arenitas glaucofanas (20%) Rocas metamórficas (9%) Granitos y Riolitas (2%) Sedimentarias rojas (1%)
Área/Unidad fuente del sedimento	N.M	N.M	N.M	N.M	Área fuente: Macizo de Santander. Unidad fuente: Fm Girón y Fm Jordán.	N.M	Área fuente: Paleocuenca del Chicamocha. Unidad fuente: Fm. Aguardiente.

Nota. Recopilación bibliográfica en base a estudios previos realizados en el Miembro Gravoso de la Fm. Bucaramanga. \*(N.M: No mencionado en el documento).

**4.1.5. Miembro Limos Rojos.** Este segmento fue definido por Julivert (1963), cubre el miembro gravoso y constituye el techo de la Fm. Bucaramanga (Niño & Vargas, 1992, p. 58); se localiza en el sector urbanizado de la ciudad, aunque no en forma uniforme y continúa hacia el sur, hasta el sector norte del municipio de Floridablanca, suprayaciendo al segmento gravoso (Ingeominas, 2001, p. 26) (*Ver Tabla 7*).

El ambiente de depositación indica un dominio de flujo de lodos combinados con caídas de bloques de la pendiente del macizo (Ingeominas, 2001, p. 26).

Tabla 7

*Cuadro comparativo del Miembro Limos Rojos*

	CARACTERÍSTICAS	De Porta (1958)	Niño & Vargas (1992)	Ingeominas (2001)
<b>Miembro Limos Rojos</b>	<b>Litología/ Sedimentología</b>	Nivel de arcillitas que a partir de la aldea Las Penas se sigue ininterrumpidamente hasta Bucaramanga, constituyendo un nivel guía excelente.	Nivel de arcilla gravoso, caracterizado por bloques angulares de baja esfericidad de areniscas blancas silíceas. Constituye el techo de la Fm. Bucaramanga.	Arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Presencia esporádica de bloques angulares de arenisca asociados superficialmente a este miembro.
	<b>Espesor</b>	Variable dependiendo del sector: aumenta desde 2m hasta 7-8 m en la carretera antigua de Girón.	N. M.	N. M.
	<b>Zona donde se midió el espesor</b>	Zona del aeropuerto	N.M.	N.M.
	<b>Ambiente</b>	N. M.	Flujo de lodo acompañado de caídas de bloques.	Dominio de flujo de lodos combinados con caídas de bloques de la pendiente del Macizo de Santander.

Nota. Recopilación bibliográfica en base a estudios previos realizados en el Miembro Limos Rojos de la Fm. Bucaramanga. \*(N.M: No mencionado en el documento).

**4.1.6. Facies Sedimentarias.** Franco & Ramírez (2018) clasifican los miembros Órganos, Finos y Gravoso en facies que reflejan la variación en el sistema de depositación, el Miembro Órganos se relaciona principalmente con amalgamamiento de barras, relleno de canales y depósitos de llanura de inundación; posteriormente una disminución en la energía del medio conlleva a la depositación de una secuencia granodecreciente que corresponde al Miembro Finos.

Un posible cambio en el régimen tectónico genera flujos turbulentos que depositan el miembro gravoso en dos facies, la primera granodecreciente, asociada a un depósito de barras de gravas, depósitos arenosos de acreción lateral por carga de lecho, que finalizan en depósitos de llanura de inundación o relleno de canal; la segunda agradacional, asociada a depósitos de barra de gravas, dicha asociación se interpreta como un sistema entrelazado de gravas somero de múltiples canales (Franco & Ramírez, 2018).

**4.1.7. Proveniencia de los sedimentos.** La proveniencia de los sedimentos que dieron origen a este depósito cuaternario aún son motivo de investigación, por lo cual, en este trabajo se realiza, a manera de tabla, una recopilación de las posturas de diferentes autores, las cuales se pueden agrupar en dos hipótesis: la primera, toma como área fuente el Macizo de Santander, a partir del cauce del río Suratá (Niño & Vargas, 1992; Ingeominas, 2001; Diederix et al., 2008; Jiménez et al., 2015); mientras que la segunda, propone la depositación a lo largo de los paleocauces de los ríos Chicamocha y Sogamoso (Julivert, 1958; García & Añez, 2017; y Franco & Ramírez, 2018) (*Ver Tabla 8*).

Julivert (1958) propone que el río Chicamocha se prolongaba por la mesa de Bucaramanga, hasta el momento en el que fue capturado en dirección occidental, donde confluye con el río Suárez, para formar el río Sogamoso. De esta manera, se da una hipótesis sobre el transporte y depositación de los sedimentos que componen la Fm. Bucaramanga, pero no se describen las características sedimentológicas de dicho cuaternario.

Por su parte Diederix et al. (2008), realiza un modelo de evolución morfotectónica cuaternaria, basada en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas

de fallas en Bucaramanga, en el cual se propone el término de Abanico aluvial para el rasgo geomorfológico que anteriormente se denominaba “terraza”; propone que este gran cuerpo de sedimentos desemboca del frente montañoso controlado por la Falla Bucaramanga.

El ancho del Abanico es mayor que su longitud y cubre una distancia de 26 km en dirección transversal, y la secuencia sedimentaria ha sido acumulada en una cuenca tectónica controlada por la convergencia de dos sistemas de fallas, el de Bucaramanga y el de Suárez, con un espesor estimado del orden de 250 a 300 m. Dado que al analizar la configuración de la superficie y la red de drenaje del Abanico, es notorio que su parte sur ha sufrido más disección que la parte norte, lo que sugiere una diferencia en edad de los depósitos, causada por la migración del depocentro en dirección norte, debido a la propagación de su ápice en ese sentido por el movimiento sinetral de la Falla Bucaramanga, siendo con toda probabilidad el drenaje alimentador el río Suratá (Diederix et al., 2008, pp. 13-15).

Autores como Jiménez (et al., 2015), describen el contexto tectónico y las características de la Falla de Bucaramanga-Santa Marta, informando sobre la investigación paleomagnética que realizaron y las características del abanico aluvial continental Plio-Pleistoceno(¿) yuxtapuesto a la Falla de Bucaramanga, atribuyendo su alimentación al aporte de sedimentos desde el Macizo de Santander por parte del río Suratá, encontrando que éste constituye el ápice del abanico, que a su vez se encuentra desplazado aproximadamente 2,5 km por la acción de dicha Falla, mencionando que esto concuerda con sugerencias previas de autores como Ingeominas (2001) y Diederix et al. (2008). Sin embargo, Jiménez et al. (2015) señala que otros autores como Julivert (1958), han propuesto considerar el aporte de material por otras fuentes, teniendo en cuenta la extensión del depósito y la poca capacidad de transporte de dicho afluente; además, que la red de drenaje actual no puede explicar la ubicación del Abanico.

Solano (2016) produjo un estudio de proveniencia de los sedimentos de la Fm. Bucaramanga al sur del Río Frio, realizando conteo de clastos y análisis de la composición de los mismos en el sector sur de la Meseta de Bucaramanga, en los municipios de Floridablanca y Girón, encontrando gran diversidad de litologías, que varían de acuerdo a su posición en la columna estratigráfica y la zona donde se tomó la muestra, siendo predominantes granito rosado, riolita, pegmatita, metamórficas foliadas, sedimentarias terrígenas claras, areniscas con glauconita y toba cristalina gris; dichas litologías las relacionó con Unidades Metamórficas tales como el Complejo de Bucaramanga, el Ortoneis de Berlín, la Fm. Silgará; Unidades Ígneas como el Granito de Pescadero, el grupo plutónico de Santander, entre otras, y unidades sedimentarias de la cuenca del Valle medio del Magdalena (VMM) y de la cuenca de Maracaibo correspondientes al Jurásico como la Fm. Girón, y al Cretácico como la Fm. La Luna entre otras unidades. Además, mediante la aplicación de la ecuación de Hooke (1968), se encontró que no hay relación entre el área de drenaje de las cuencas de los ríos Frio, del Hato, de Oro, Suratá, Chicamocha y Sogamoso, con el área del abanico, por lo cual, propone que no parece ser posible que el depósito sea un abanico aluvial generado por una de estas corrientes, descartando así, una única fuente de sedimento para la Fm. Bucaramanga (Solano, 2016, pp. 144-146).

Así mismo, al analizar la composición de las unidades aflorantes en el área de las cuencas, descarta como fuente los Ríos Frío, del Hato y de Oro, debido a que, en el área de drenaje de estos ríos, no afloran las Unidades Litoestratigráficas previamente relacionadas con los clastos analizados (Solano, 2016, pp. 146, 147). Igualmente encontró que en el área de drenaje del Río Suratá, propuesta en varios trabajos previos como la fuente del depósito (Niño & Vargas 1992, Ingeominas 2001, 2005 y Jiménez et al., 2015), no afloran las unidades definidas como indicadores de prove-

niencia (Granito de Pescadero, Arenisca con glauconita y Toba cristalina gris), por lo que probablemente éste no fue el cauce principal que transportó y depositó estos sedimentos; mientras que, en la cuenca de drenaje del Río Chicamocha, evidenció que las litologías predominantes están presentes, por lo cual propone que éste pudo ser el cauce o parte del cauce principal que transportó y depositó los sedimentos que constituyen la Fm. Bucaramanga (Solano, 2016, pp. 146-151).

García & Añez (2017) trabajaron la evolución reciente de los ríos Chicamocha y Suárez, dando una recopilación bibliográfica de la historia evolutiva de las cuencas de drenaje que dieron origen a los actuales cauces, encontrando que a partir de la orogenia de la Cordillera Oriental y la elevación del Macizo de Santander, se acentuaron los cambios en los patrones de drenaje, dada una tendencia de rápida denudación, llegando a que a partir del Plioceno – Pleistoceno, los orógenos tienden al desarrollo de drenajes transversales; considerando que durante el Plioceno se inició la depositación de la Fm. Bucaramanga (Jiménez et al., 2015) dentro de un ambiente fluvial con alternancia aluvial, y siguiendo el modelo propuesto por Julivert (1958), los paleo cauces de los ríos Suárez y Chicamocha depositaban su material en la Mesa de Bucaramanga.

Franco & Ramírez (2018) realizaron la reconstrucción paleoambiental de los Miembros Órganos, Finos y Gravoso de la Fm. Bucaramanga, interpretando que el sistema de depósito de la Formación Bucaramanga obedece a un sistema fluvial trenzado cuya configuración depende de las fluctuaciones en la energía del medio, generadas por controles alogénicos (clima y tectónica), dado que se ubica en una cuenca Intramontana cerrada con principal aporte de sedimentos al Sur del depósito.

Tabla 8

*Proveniencia de los sedimentos que componen la Formación Bucaramanga según propuestas de diferentes autores*

Proveniencia de sedimentos de la Fm. Bucaramanga							
Área fuente el Macizo de Santander a partir del cauce del río Suratá			Deposición por parte de los paleocauces Chicamocha y Sogamoso				
Niño & Vargas (1992)	Ingeominas (2001)	Diederix et al. (2008)	Julivert (1958)	De Porta (1959)	Solano (2016)	García & Añez (2017)	Franco & Ramírez (2018)
<ul style="list-style-type: none"> <li>La reactivación de la falla de Bucaramanga forma una depresión tectónica.</li> <li>Procesos glaciares al este de la falla producen denudación, erosión y transporte de las unidades cretácicas.</li> <li>Levantamiento rápido del macizo y altos períodos de pluviosidad (mayor aporte de sedimentos).</li> <li>Migración al norte del río Suratá debido al desplazamiento sinistral de la falla de Bucaramanga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Morfológicamente corresponde a un abanico aluvial erosionado.</li> <li>Ambiente típicamente fluvial donde alternan materiales de origen aluvial tipo como de deyección, flujo de escombros, canal y lagunar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Considera con una certeza del 100% que ha sido el río Suratá el cauce principal que depositó los sedimentos que componen la Fm. B/manga.</li> <li>Se basa en la geomorfología y el control estructural de la zona.</li> <li>La desembocadura del Río Suratá actualmente se encuentra 2,5 km al norte del ápice del abanico, esta distancia se considera como el desplazamiento de la falla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deposición de los sedimentos por el paleo-cauce del río Sogamoso que continuaba por Chocó hasta el río de Oro y de Lebrija.</li> <li>Menciona similitud de las hombreras que existen sobre los ríos Sogamoso y Chicamocha con la terraza de Bucaramanga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se basa en las observaciones de Julivert (1958).</li> <li>Señala la relación de los ríos Suratá y Oro con una masa torrencial que aflora en el norte de la ciudad, que difiere de la Fm. Bucaramanga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A partir de la correlación de litologías determina que el río Chicamocha puede ser el cauce principal junto con el Sogamoso.</li> <li>Los ríos Suratá, de Oro y Frio serían aportes laterales de sedimentos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reorganización fluvial.</li> <li>Proveniencia de los sedimentos en sentido S y SE, siendo los aportes los antiguos cauces de los ríos Suratá y Chicamocha.</li> <li>Aporte lateral de los ríos Frio, del Hato, de Oro y Suratá.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuenca intramontana que obedece a un sistema fluvial trenzado.</li> <li>Paleocorrientes en sentido SE-NW SW-NE, relacionado con el paleo-cauce del río Chicamocha - Suárez.</li> <li>Ausencia de evidencia en cuanto al aporte aluvial producido de los ríos Suratá, Frio, Hato y de Oro.</li> </ul>

Nota. Recopilación del estado del arte. Muestra ocho posturas que presentan diferentes autores acerca de la proveniencia de los sedimentos que dieron origen a la denominada Formación Bucaramanga, aunque con algunas ligeras variaciones entre ellas, esas posturas se pueden agrupar en dos hipótesis fundamentalmente: la primera, propone como área fuente el Macizo de Santander, a partir del cauce del río Suratá; la segunda, plantea la deposición por parte de él o los paleocauces de los ríos Chicamocha y Sogamoso.

## 4.2. Cartografía Geológica

La cartografía geológica de la zona de estudio se obtuvo a partir del levantamiento fotográfico realizado por medio del dron y la integración de la información litológica obtenida durante el trabajo de campo.

**4.2.1. Levantamiento fotográfico.** La toma de fotografías aéreas a través del uso de dron para la captura, procesado y visualización de datos tridimensionales es de gran interés en el campo de la geología, ya que presenta numerosas ventajas para la obtención de información geológica y del terreno; además, gracias a la integración de diferentes tecnologías como láser, radar, sónar, cámaras, etc., ofrece diversidad de posibilidades para su uso extensivo en las diferentes ramas de las Ciencias de la Tierra (Lozano & Gutiérrez, 2016, p. 97).

A partir de las imágenes obtenidas y mediante el uso de herramientas de geoprocésamiento en software SIG con el apoyo del grupo de investigación en GEOMÁTICA UIS, a partir de la nube de puntos se obtuvo el orto mosaico que se muestra en la *Figura 15*, cuya visualización en tres dimensiones permite tener una mejor perspectiva de la zona donde se realiza el estudio, lo que a su vez sirve de base para la elaboración del mapa geológico (*Figura 16*). La zona cubierta por el levantamiento fotográfico sólo abarca los afloramientos  $\Delta 2$  y  $\Delta 3$ , el afloramiento  $\Delta 1$  no aparece en la imagen debido a que se encuentra cerca de la zona de disposición final “la escombrera”, la cual, por disposiciones administrativas no se puede fotografiar.



*Figura 15.* Orto mosaico obtenido a partir de la nube de puntos con herramientas de geoprocésamiento en software SIG, mostrando la disposición espacial de los afloramientos  $\Delta 2$  y  $\Delta 3$ . El afloramiento  $\Delta 1$  no se muestra en la imagen por restricciones administrativas de la EMAB en el relleno sanitario. Autoría con el apoyo del grupo de investigación en GEOMÁTICA UIS.

**4.2.2. Mapa Geológico del área de estudio.** Se realizó la cartografía geológica del área de estudio, delimitando los Miembros Órganos (Qbo), Finos (Qbf), Gravoso (Qbg) y Limos Rojos (Qblr). El Miembro Órganos se mapea a partir de estudios previos realizados en la formación

(Ingeominas, 2001; Jiménez et al., 2015). Los miembros Finos, Gravoso y Limos Rojos se cartografiaron a partir de trabajo de campo.

La unidad predominante que aflora en el relleno sanitario corresponde a Qbo, sobre la cuál se construye el relleno. Los afloramientos de las unidades Qbf y Qbg están en las cotas donde actualmente se realiza la adecuación para disponer nuevos espacios de relleno. Qblr aflora al oriente, en la salida al sector del barrio el Porvenir, en la cota más elevada, por lo cual, sobre este miembro aún no se interviene en labores del relleno, en los predios aledaños se observan ladrilleras que aprovechan el material arcilloso.

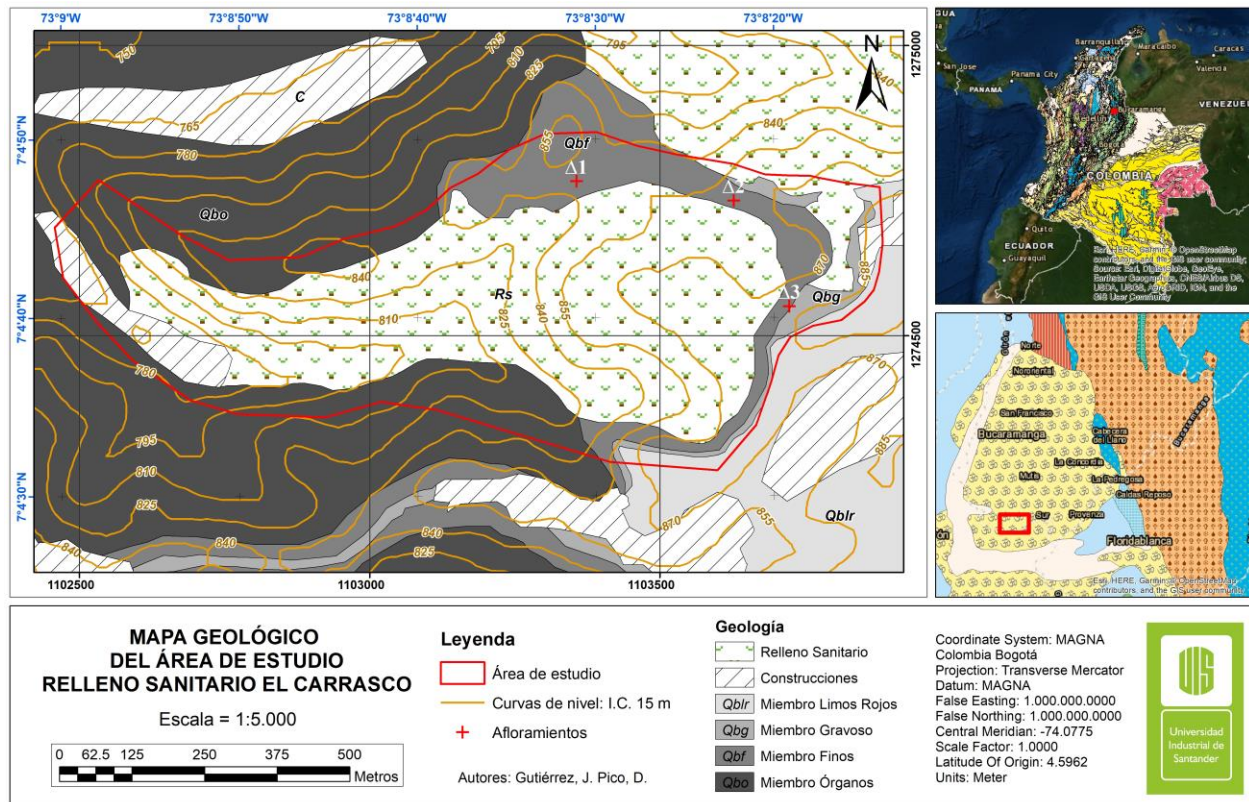


Figura 16. Mapa geológico mostrando las unidades aflorantes en la zona de estudio, que corresponden a los Miembros Qbo, Qbf, Qbg y Qblr de la Fm. Bucaramanga.

### 4.3. Descripción de unidades geológicas

Las unidades litológicas descritas a continuación corresponden a los Miembros Finos y Gravoso de la Formación Bucaramanga, caracterizadas a partir del levantamiento de tres columnas estratigráficas, presentadas dentro de este apartado.

**4.3.1. Miembro Finos (Qbf).** El Miembro Finos es la unidad que predomina en los tres afloramientos donde se levantaron secciones estratigráficas; aflora en las cotas de altura de 840 m hasta 870 m, con un espesor medido de 33.5 m y se relaciona al descrito anteriormente por Hubach (1952), Niño & Vargas (1992), Bueno & Solarte (1994), Ingeominas (2001) e Ingeominas (2010). En la zona de estudio el contacto inferior con el Miembro Órganos fue determinado a partir de trabajos previos.

Litológicamente se reconocen dos niveles concordando con Niño & Vargas (1992) e Ingeominas (2010): el nivel inferior, compuesto por arcilla plástica masiva, de color gris verdoso, muy cohesiva y altamente alterada, a la base de la columna estratigráfica  $\Delta 1$ , con un espesor de 4.8 m. Se encuentra en contacto neto a suavemente ondulado con el nivel superior que corresponde a un conjunto arenoso que varía de arenas muy finas a arenas gruesas lodosas y limoarenosas, de color amarillo a pardo amarillento, granocreciente interestratificado, planoparalelo subhorizontal, de geometría tabular, con 28 m de espesor, sin evidencia de estructuras sedimentarias.

A partir de la información obtenida en campo se determinaron tres litofacies para este miembro, según Miall (1996), descritas así:

- **Fm:** arcilla plástica masiva con laminación plano-paralela.
- **Sm:** arenas de granulometría variable, que va de fina a gruesa, con estructura masiva y laminación débil.

- **Sh:** arenas muy finas a gruesas, ligeramente granulosa, estratificación horizontal en capas de geometría tabular.

#### 4.3.1.1. Columna Estratigráfica y descripción de muestras ( $\Delta 1$ ): Miembro Finos.

COORDENADAS:

X = 1'274.766 N

Y = 1'103.355 E

Z = 840 m



Figura 17. Fotografía del afloramiento del Miembro Finos ( $\Delta 1$ ), donde se evidencia el contacto entre los niveles inferior (A1) y superior (B1 y C1).

Se observa un afloramiento de 11.4 m de altura y 40 m de largo, el cual presenta de manera general tres niveles, denominados A1, B1 y C1, definidos por cambios de coloración y de textura. Hacia la base presenta material removido que constituye suelo transportado de llenos antrópicos.

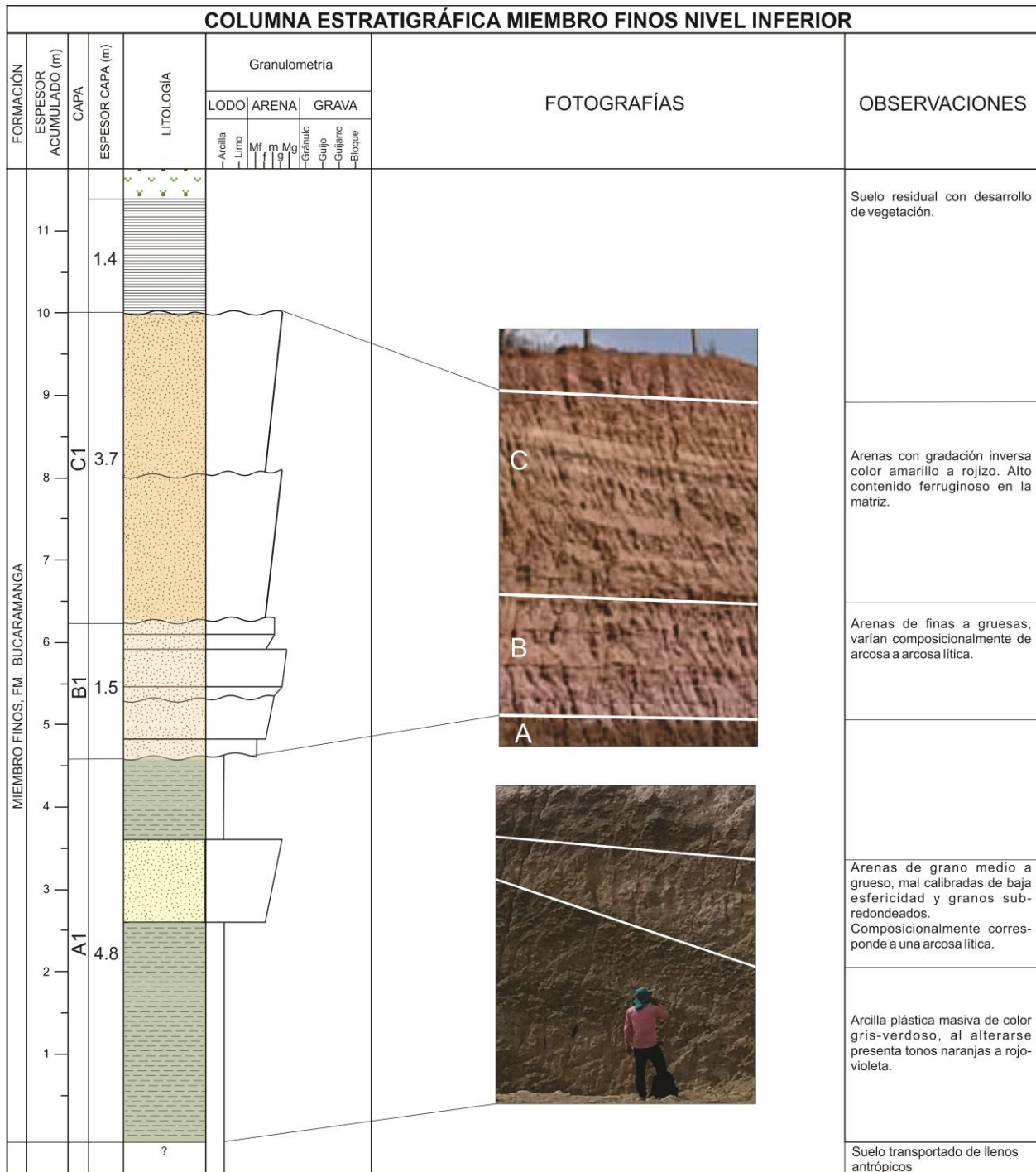


Figura 18. Columna Estratigráfica del Miembro Finos ( $\Delta 1$ ), contacto entre el nivel inferior (A1) y el nivel superior (B1 y C1).

- **Nivel A1:** nivel inferior del Miembro Finos, tiene un espesor de 4.8 m, presenta tres variedades litológicas, al occidente posee una coloración superficial marrón y color de la muestra fresca verde-grisáceo, que corresponde a facies Fm, se describe litológicamente como una arcilla plástica masiva de tonalidades gris verdosa, superficialmente alterada exhibiendo coloraciones de naranja a violetas; presenta tres lentes arenosos de 35, 40 y 29 cm de espesor cada uno.

Hacia el oriente del afloramiento se evidencia una estructura incompleta (delimitado por color magenta), que se interpreta como un cambio lateral de facies de Fm a Sh, hacia su base presenta gravas de tamaños variables, llegando hasta guijas, los clastos son subredondeados de diámetro promedio 15 cm, incluidos en una matriz de arenas gruesas silíceas de color naranja.

- **Muestra JD-1-1:** diez clastos recolectados de manera aleatoria, dentro de los cuales se identificaron dos clastos de cuarzo, tres de arenisca y cinco de rocas ígneas. El diámetro promedio de los clastos evaluados es de 3.8 cm. La matriz dentro de la que se encuentran es una arena de grano medio a grueso de tonalidades amarillas a naranjas, grano-soportadas de matriz areno-lodosa, mal calibradas, en las arenas gruesas la esfericidad es mala y granos subangulares y en las arenas medias a finas la esfericidad es media y los granos van de subredondeados a redondeados. Composicionalmente la roca se clasifica como una arcosa, está compuesta por cuarzo en un 45%, feldespato 25%, minerales accesorios 20% (micas) y fragmento de rocas 5%. El contacto entre las partículas va de flotante a puntual, texturalmente inmadura.



Figura 19. Fotografía de la muestra JD-1-1.

- Muestra JD-1-2: arena lodosa de tamaño de grano medio de color gris verdoso, bien cementada, moderadamente calibrada, granos esféricos subangulares, con armazón intermedio 45% areno soportado, matriz lodosa 40% y con cemento silíceo 10%, empaquetamiento intermedio, porosidad primaria del 5%. Composicionalmente la roca se clasifica como una arcosa, está compuesta por cuarzo en un 45%, feldespato 43%, minerales accesorios 7% (micas) y fragmento de rocas 5%. El contacto entre las partículas va de flotante a puntual, texturalmente inmadura.



*Figura 20.* Fotografía de la muestra JD-1-2: arena lodosa.

- Muestra JD-1-3: arena de tamaño de grano muy grueso ligeramente granulosa de color amarillo a gris, mal cementada, grano-soportada, pobremente calibrada, granos de angulares a subangulares, esfericidad media. Armazón 75% grano soportado, matriz 20% y con cemento silíceo 5%, empaquetamiento intermedio, porosidad primaria del 8%. Composicionalmente la roca se clasifica como una arcosa, está compuesta por cuarzo en un 35%, feldespato 15%, minerales accesorios 15% (micas) y fragmento de rocas 35%. El contacto entre las partículas va de flotante a puntual, texturalmente inmadura.
  
- Muestra JD-1-4: arcilla masiva de tonalidades gris-verdosa con alta plasticidad, presenta un 2% de granos de arena de tamaño fino de color blanco, se altera rápidamente presentando color naranjado fuerte.



Figura 21. Fotografía de la muestra JD-1-4: arcilla masiva.

- **Nivel B1:** segundo nivel identificado, con un espesor promedio de 1.5 m, coloración superficial amarilla a rosada por alteración, el color de la muestra fresca es grisácea y rojiza en algunos niveles, presenta tres niveles de base a techo con gradación normal, inversa e inversa correspondientemente.

El nivel B1 corresponde a facies Sm, se describe litológicamente como una arena de grano muy fino lodosa con laminación plano-paralela y ondulosa de color gris crema con tonalidades rosadas, texturalmente inmadura. Composicionalmente se clasifica como una arcosa lítica, está compuesta por cuarzo en un 35%, feldespato 45%, minerales accesorios

5% (micas) y fragmento de rocas 15%. El contacto entre las partículas es puntual, texturalmente inmadura.

- **Nivel C1:** correspondiente al último nivel con un espesor de 4.8 m, coloración superficial rosado-amarillento, muestra dos niveles con gradación inversa, Sh y Sm, continuando la secuencia del nivel B1, pero con estratos más espesos.

#### 4.3.1.2. *Columna Estratigráfica y descripción de muestras ( $\Delta 2$ ): Miembro Finos nivel superior.*

COORDENADAS:

X= 1'274.734 N

Y = 1'103.620 E

Z = 856 m

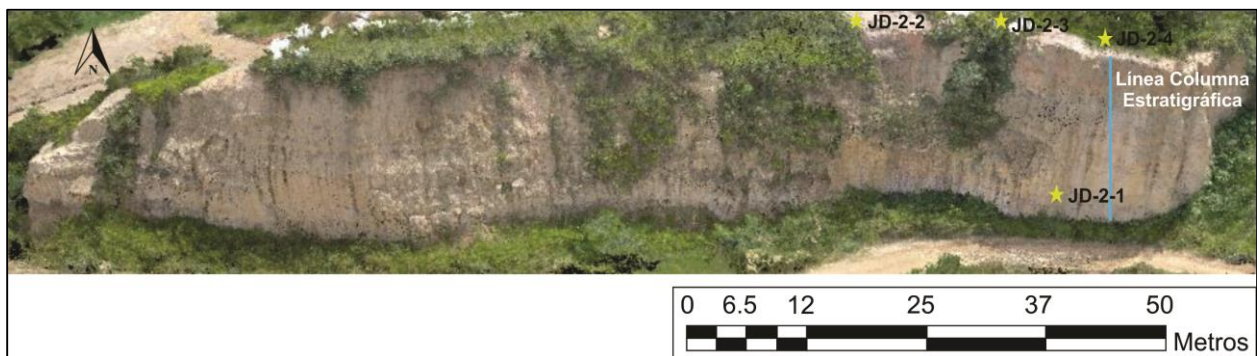


Figura 22. Fotografía de afloramiento del Miembro Finos nivel superior ( $\Delta 2$ ), obtenida por medio de imágenes aéreas empleando drone con el apoyo de GEOMÁTICA UIS.

Se identifica el nivel superior del Miembro Finos en un afloramiento de entre 16 a 22 m de alto por 129 m de ancho, cubierto por una densa capa de material lavado que proviene de la parte superior, presenta alta bioturbación y desarrollo de vegetación. Dadas las dimensiones del afloramiento fue necesario el uso de fotografías aéreas por medio del uso de drone para el cubrimiento y descripción total de este.

Se describen los siguientes niveles denominados A2, B2, C2, D2, E2, F2, G2, H2, I2, J2, K2, L2, M2, N2, O2, P2 y Q2.

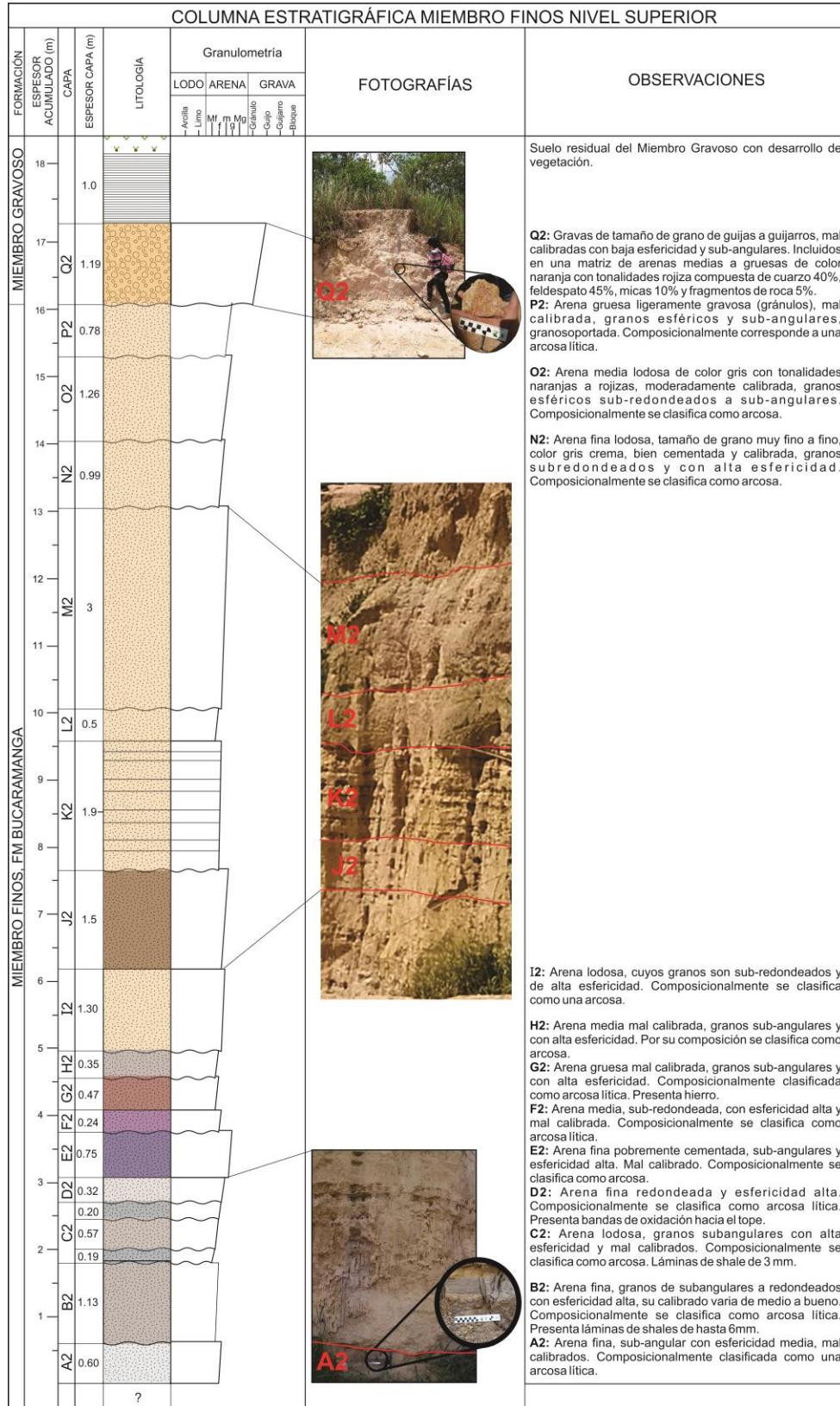
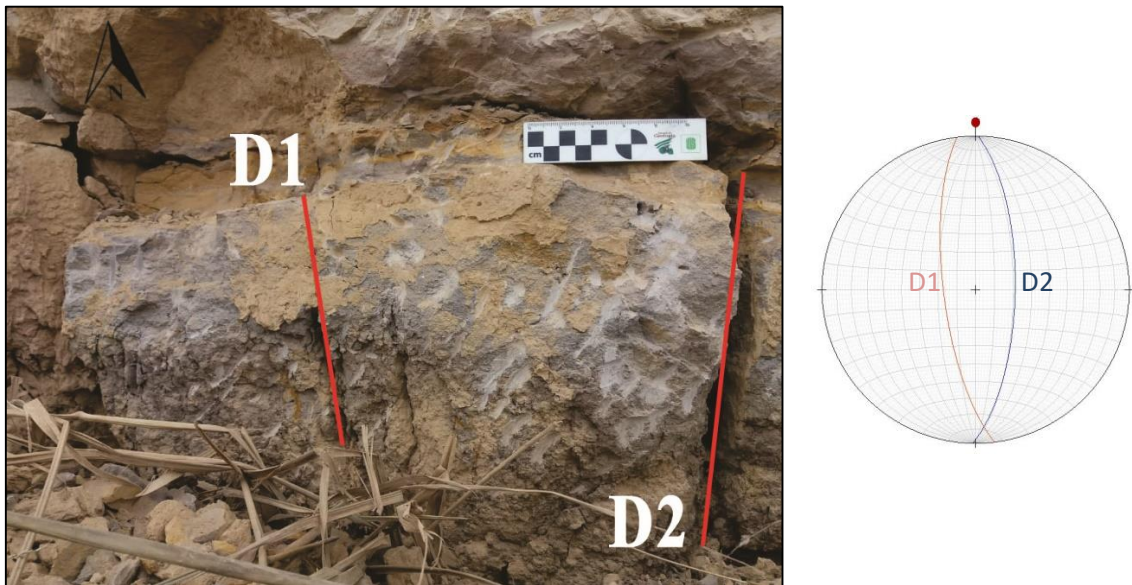


Figura 23. Columna Estratigráfica (Δ2) correspondiente al Miembro Finos nivel superior.

- **Nivel A2:** nivel de 60 cm que corresponde a arena fina, con tamaños de grano de muy fino a medio, granos subangulares con esfericidad media, mal calibrados. Composicionalmente clasificada como una arcosa lítica.

En este nivel que constituye la base del afloramiento  $\Delta 2$  (Miembro Finos nivel superior) se reconocieron dos familias de diaclasas, las cuales tienen una dirección  $D_1$ .  $173^\circ/69^\circ$  y  $D_2$ .  $3^\circ/73^\circ$  en azimut de rumbo. Estas fracturas son continuas en la horizontal, pero no continúan en la vertical, puesto que no están presentes en los niveles superiores. Además, estas diaclasas no se registran en los afloramientos  $\Delta 1$  y  $\Delta 3$ .



*Figura 24.* Diaclasas en la base del afloramiento  $\Delta 2$  ( $D_1$ : familia 1 y  $D_2$ : familia 2).

- **Nivel B2:** arena fina, con tamaños de grano que varían de fino a medio, granos de subangulares a redondeados con esfericidad alta, su calibrado varia de medio a bueno. Composicionalmente se clasifica como arcosa lítica. Presenta láminas de shales de hasta 6mm.
  
- **Nivel C2:** arena lodosa, con tamaños de grano de muy fino a fino, cuyos granos son subangulares de alta esfericidad y mal calibrados. Composicionalmente se clasifica como arcosa. Láminas de shale de 3mm.
  
- **Muestra JD-2-1:** arena fina lodosa, de tamaño de grano muy fino a fino de color gris crema, bien cementada, bien calibrada, de granos subredondeados y con alta esfericidad. Con armazón intermedio, 45% areno-soportado, matriz lodosa 40%, cemento silíceo 11% y porosidad primaria del 4%. Composicionalmente se clasifica como arcosa, está compuesta por feldespato 60%, cuarzo 20%, minerales accesorios (micas) 15% y fragmentos de roca 5%. El contacto entre las partículas es flotante y es texturalmente madura. Presenta laminación plano-paralela horizontal además tiene intercalación con láminas de color gris oscuro de hasta 4mm de espesor de materia orgánica.



Figura 25. Fotografía de la muestra JD-2-4: arena fina lodosa.

- **Nivel D2:** arena fina, con tamaños de grano de fino a medio, granos redondeados y de alta esfericidad. Composicionalmente se clasifica como arcosa lítica. Presenta bandas de oxidación hacia el tope.
- **Nivel E2:** arena fina mal calibrada, con tamaños de grano que varían de fino a medio, pobremente cementada, granos subangulares y con alta esfericidad. Composicionalmente se clasifica como arcosa.
- **Nivel F2:** arena media, su tamaño de grano va de medio a grueso, sus granos son subredondeados, con alta esfericidad y mal calibrados. Composicionalmente se clasifica como arcosa lítica.

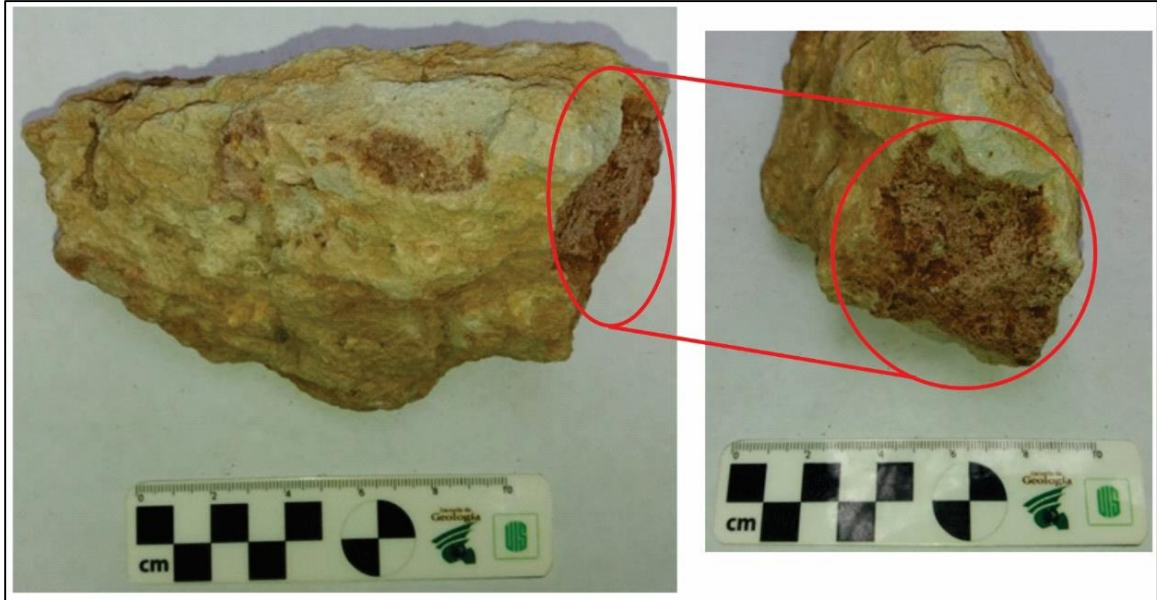
- **Nivel G2:** arena gruesa mal calibrada, cuyos tamaños de grano varían de medio a muy grueso, sus granos son subangulares y con alta esfericidad. Presenta láminas de hierro, composicionalmente se clasifica como arcosa lítica.
  
- **Nivel H2:** arena media mal calibrada, cuyo tamaño de grano varía de fino a medio, sus granos son subangulares y con alta esfericidad. Por su composición se clasifica como arcosa. Presenta tonos verdes por alteración.
  
- **Nivel I2:** arena lodosa, de tamaño de grano de muy fino a fino, mal calibrada, sus granos son subredondeados y con alta esfericidad. Composicionalmente se clasifica como una arcosa.
  
- **Nivel N2:** arena fina lodosa, tamaño de grano muy fino a fino, color gris crema, bien cementada y calibrada, sus granos son subredondeados y con alta esfericidad. Composicionalmente se clasifica como arcosa.
  
- **Nivel O2:** arena media lodosa moderadamente calibrada, con tamaños de grano que varían de medio a grueso, de color gris con tonalidades naranjas a rojizas, sus granos son esféricos subredondeados a subangulares. Composicionalmente se clasifica como arcosa.
  
- **Nivel P2:** arena gruesa mal calibrada, los tamaños de grano varían de grueso a muy grueso, ligeramente gravosa (gránulos), sus granos son esféricos y subangulares, con armazón granosoportado. Composicionalmente corresponde a una arcosa lítica.

- **Nivel Q2:** corresponde a un nivel de gravas de tamaño de grano de guijas a guijarros, mal calibradas con baja esfericidad y subangulares, incluidas en una matriz de arenas medias a gruesas de color naranja con tonalidades rojiza compuesta de cuarzo 40%, feldespato 45%, micas 10% y fragmentos de roca 5%.
  
- Muestra JD-2-2: arena gruesa de tamaño grano de grueso a muy grueso, ligeramente gravosa, gránulos, de color gris con tonalidades naranjas y rojizas por alteración, con alta bioturbación, pobre cementada, mal calibrada, granos esféricos subangulares, con armazón 60% grano soportada, matriz lodosa 30%, porosidad 6% que corresponde 2% primaria por los intersticios dejados entre los granos y 4% secundaria por bioturbación y con cemento silíceo escaso 4%. Composicionalmente la roca se clasifica como una arcosa lítica, está compuesta por feldespato en un 45%, cuarzo en un 40%, fragmentos de roca (cuarzo) 10% y minerales accesorios 5% (micas). El contacto entre las partículas es puntual, texturalmente inmadura.



*Figura 26.* Fotografía de la muestra JD-2-1: arena gruesa ligeramente gravosa.

- Muestra JD-2-3: arena media lodosa de tamaño grano de medio a grueso, color gris con tonalidades naranjas y rojizas por alteración con bioturbación, moderadamente calibrada, granos esféricos subredondeados a subangulares, con armazón 50% grano soportada, matriz lodosa 40%, con cemento silíceo 6% y porosidad 4% que corresponde 2% primaria por los intersticios dejados entre los granos y 2% secundaria por bioturbación. Composicionalmente la roca se clasifica como una arcosa, está compuesta por feldespato en un 60%, cuarzo en un 30%, fragmentos de roca 5% y minerales accesorios 5% (micas). El contacto entre las partículas es flotante, texturalmente inmadura.



*Figura 27.* Fotografía de la muestra JD-2-2: arena media lodosa.

- Muestra JD-2-4: arena media lodosa de tamaño grano de fino a medio de color gris crema con tonalidades naranjas y ocasionalmente rojizas por alteración con alta bioturbación, moderadamente calibrada, granos esféricos subredondeados, con armazón 42% intermedia, matriz lodosa 45%, con cemento silíceo 8% y porosidad 5% que corresponde a primaria por los intersticios dejados entre los granos y secundaria por bioturbación. Composicionalmente la roca se clasifica como una arcosa, está compuesta por feldespatos en un 60%, cuarzo en un 30%, minerales accesorios 7% (micas) y fragmentos de roca 3%. El contacto entre las partículas es flotante, texturalmente inmadura.

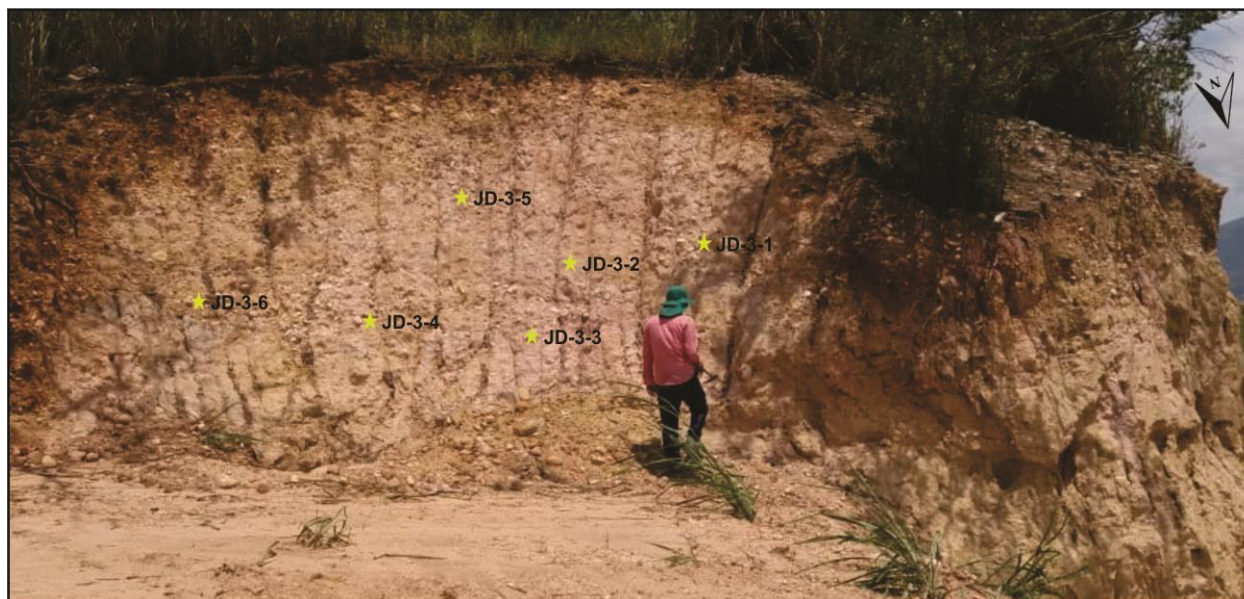


Figura 28. Fotografía de la muestra JD-2-3: arena media lodosa.

- **Nivel R2:** Suelo residual del Miembro Gravoso.

**4.3.2. Miembro Gravoso (Qbg).** El Miembro Gravoso se encuentra como suelo residual al tope de la columna estratigráfica dos y aflora al tope de la columna estratigráfica tres (Figura 29), en contacto erosivo suprayaciendo al Miembro Finos, en la cota de altura 870 m, con un espesor medido en campo de 3 m. Litológicamente corresponde a gravas de tamaño de grano de guijas a guijarros, mal calibradas predominantemente con baja esfericidad y subredondeadas, incluidas en una matriz de arena gruesa mal calibrada de color gris con tonalidades naranjas.

A partir de la información obtenida en campo se determinó la litofacie **Gmg** para este miembro, según Miall (1996), descrita como gravas matriz soportadas heterométricas de tamaños hasta guijarros.



*Figura 29. Fotografía mostrando el afloramiento del Miembro Gravoso, que se ubica al tope de la columna estratigráfica  $\Delta 3$ .*

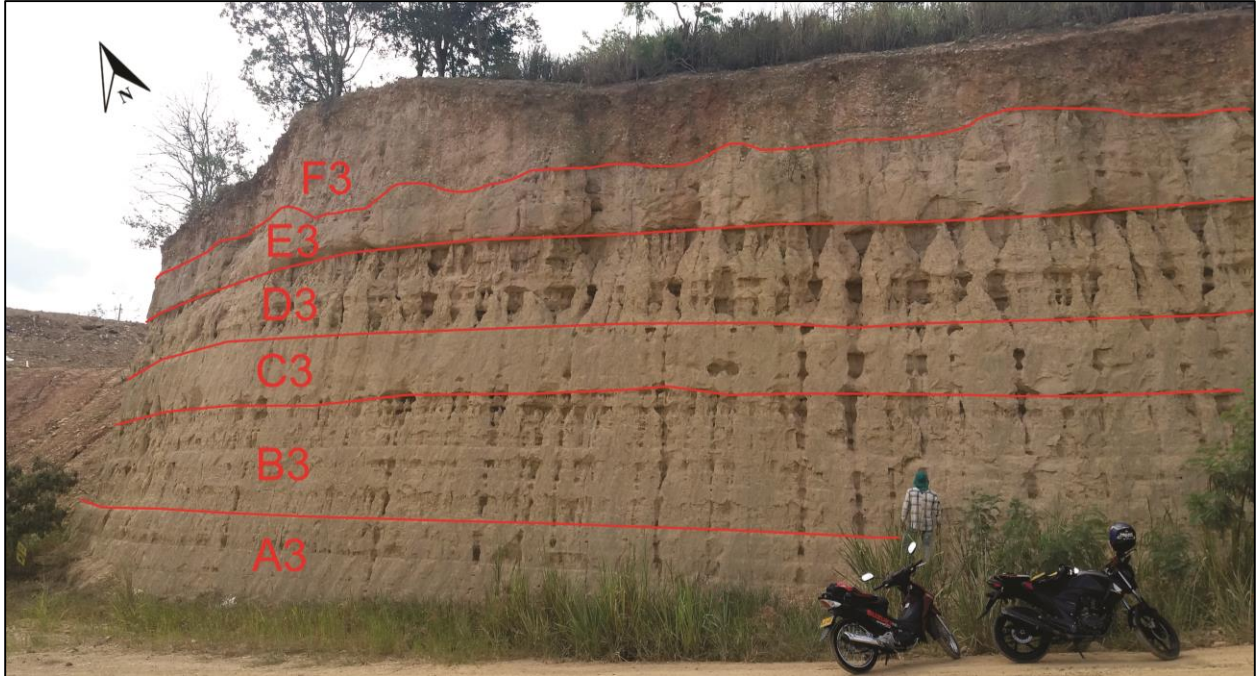
***4.3.2.1. Columna Estratigráfica y descripción de muestras ( $\Delta 3$ ): contacto entre el Miembro Finos nivel superior y el Miembro Gravoso.***

COORDENADAS:

X = 1'274.551 N

Y = 1'103.717 E

Z = 870 m



*Figura 30.* Fotografía del afloramiento  $\Delta_3$ , correspondiente al nivel superior del Miembro Finos (A3, B3, C3, D3 y E3) en contacto erosivo con el Miembro Gravoso (F3), mostrando los seis niveles en los que se dividió el afloramiento durante la realización de la columna estratigráfica.

Se observa un afloramiento de 43 m de ancho por 13 m de alto, presenta seis niveles identificados a partir de los cambios de textura, el grado de erosión y el color, de base a techo estos se denominaron A3, B3, C3, D3, E3, F3 (*Figura 30*). De los cuales A3, B3, C3, D3 y E3 corresponden al Miembro Finos (nivel superior) y el nivel F3 es correspondiente al Miembro Gravoso.

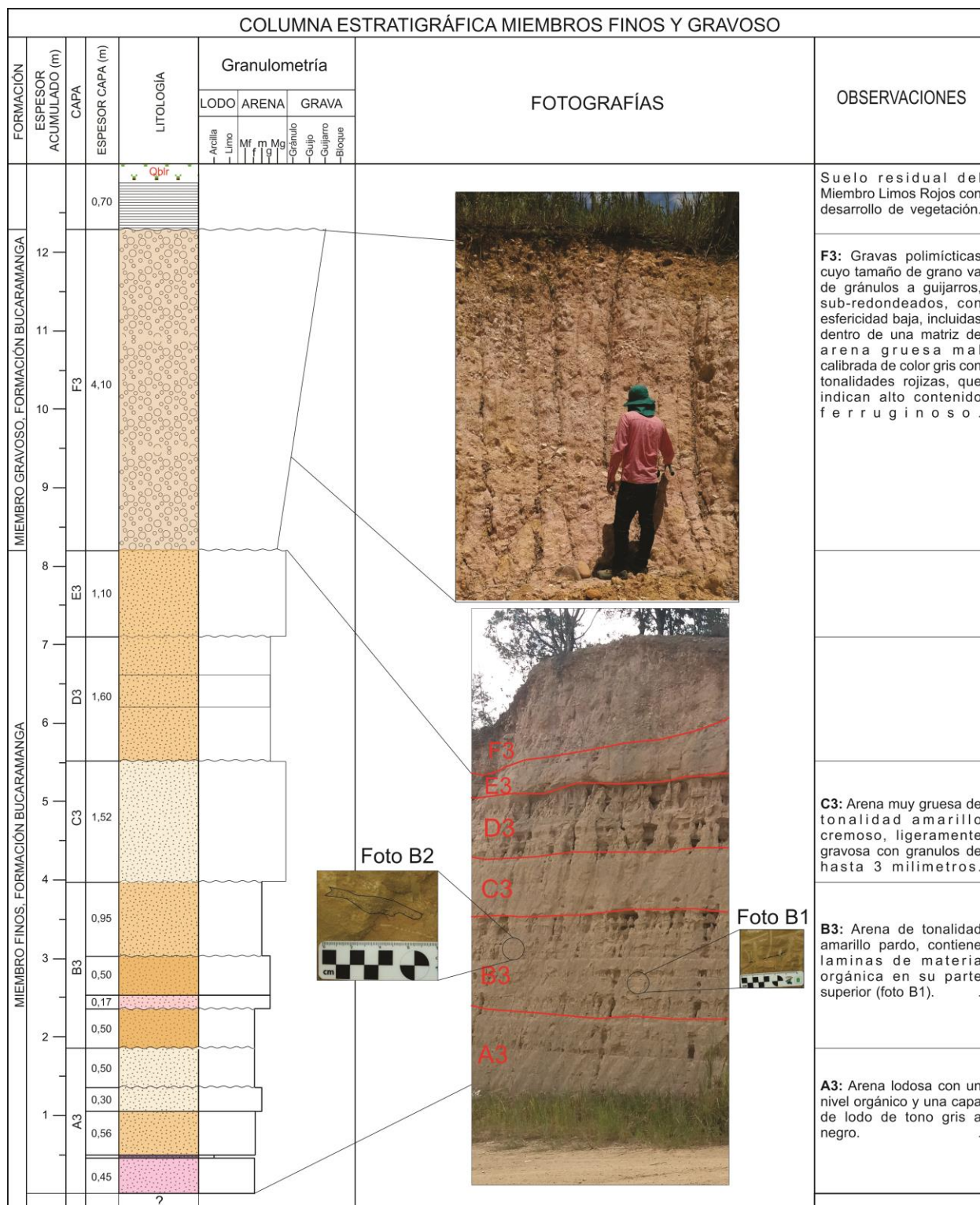


Figura 31. Columna Estratigráfica Δ3 mostrando el contacto entre el Miembro Finos (nivel superior) y el Miembro Gravoso.

**MIEMBRO FINOS:**

- **Nivel A3:** nivel inferior con un espesor de 1.81 m, presenta una coloración superficial amarillenta a grisáceo, con intercalaciones de niveles arcillosos de 4cm de espesor. El nivel A corresponde a facies Fl, se describe litológicamente como arenas finas, tamaño de grano de muy finas a medias, mal calibrado, redondeado y con alta esfericidad. Composicionalmente se clasifica como una arcosa.
  
- **Nivel B3:** nivel de espesor 2.12 m, su coloración superficial es amarillo grisáceo a naranja. Es un nivel que corresponde a facies Sm, presenta una variación de arenas finas a gruesas, mal calibradas, de redondeadas a subredondeadas y con alta esfericidad; presentando una gradación inversa. Composicionalmente corresponden a una arcosa, localmente presenta láminas de materia orgánica.
  
- **Nivel C3:** nivel de espesor 1.52 m, de color amarillo crema. Corresponde a facies Sh, se describe como una arena muy gruesa ligeramente gravosa con gránulos de hasta 3mm. Composicionalmente corresponde a una arcosa.
  
- **Nivel D3:** este nivel tiene un espesor de 1.60 m. No presenta acceso, por medio de comparaciones de color y tipo de erosión se asemeja al nivel B3 superior.
  
- **Nivel E3:** Nivel de espesor 1.10m, No presenta acceso, por medio de comparaciones de color y tipo de erosión se asemeja al nivel C3.

En el extremo más al sur del afloramiento  $\Delta 3$ , se reconoce un contacto erosivo entre un coluvión y el nivel E3 del Miembro Finos, dicho coluvión corresponde a un depósito de arenas sucias gravosas, en apariencia similares a un flujo de escombros, sobre el cual ya se desarrolló suelo; presenta un nivel de gravas orientadas cuya dirección es  $73^{\circ}/28^{\circ}$ . Las gravas son de tamaño variable, llegando hasta guijas, incluidas en una matriz arenosa gruesa, de tonalidades naranjas y rojizas (*Ver Figura 32*).



*Figura 32.* Fotografía tomada por los autores mostrando el contacto entre un coluvión y el Miembro Finos de la Fm. Bucaramanga.

## MIEMBRO GRAVOSO

- **Nivel F3:** Nivel de espesor 4.10 m, de coloración amarillo crema a naranja, corresponde a facies Gmg, descrito como clastos de tamaño de guijas a gujarros dentro de una matriz de arena fina a media, bien calibrada, con granos subredondeados y de alta esfericidad.

A continuación se describen seis muestras de clastos colectados en el Miembro Gravoso (Nivel F3), muestras representativas de este estrato en el cual se realizó el conteo de clastos para el análisis composicional:

- Muestra JD-3-1: arenisca fina lodosa (waca), de tamaño de grano de muy a media de color pardo con tonalidades rojizas y crema en superficie expuesta, pobremente calibrada, granos subredondeados esféricos. Composicionalmente se clasifica como una litoarenita feldespatica, contiene fragmentos de limolitas rojias con un diametro de hasta 2 cm.

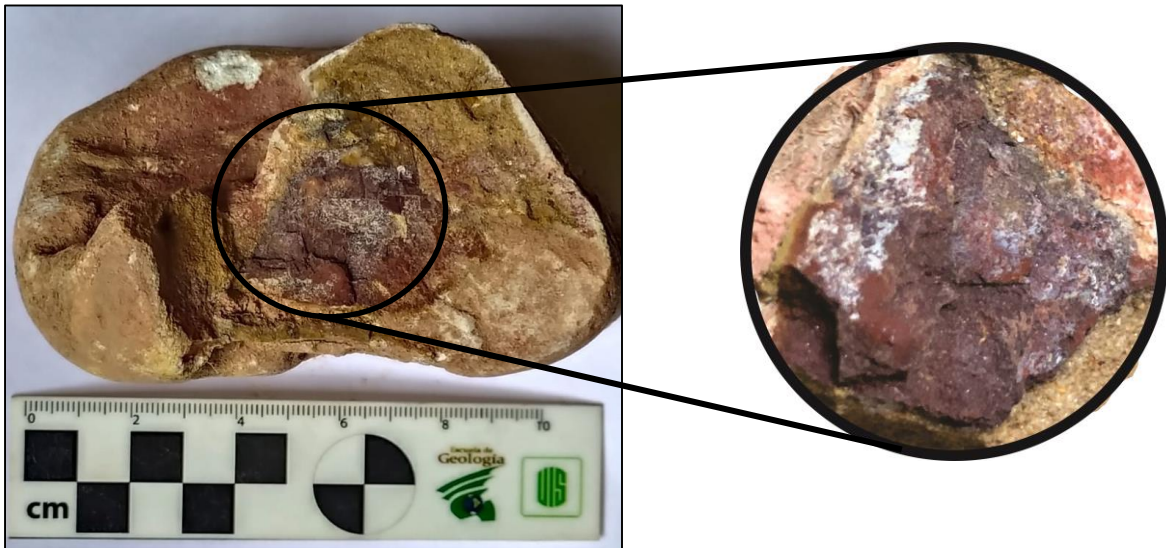


Figura 33. Fotografía de la muestra JD-3-1: arenisca fina lodosa.

- Muestra JD-3-2: arenisca gruesa, de tamaño de grano de grueso a ligeramente conglomerático de color gris rojizo, con tonalidades cremas y violetas en superficie expuesta, moderadamente calibrada, granos subredondeados a redondeados con baja esfericidad. Composicionalmente se clasifica como arcosa.



*Figura 34.* Fotografía de la muestra JD-3-2: arenisca gruesa ligeramente conglomerática.

- Muestra JD-3-3: arenisca gruesa, tamaño de grano de medio a muy grueso, de color pardo con tonalidades gris crema y rojizo, moderadamente calibrado, granos subangulares a subredondeados con alta esfericidad. Composicionalmente se clasifica como una arcosa.



*Figura 35.* Fotografía de la muestra JD-3-3: arenisca gruesa ligeramente conglomerática.

- Muestra JD-3-4: arenisca muy gruesa, ligeramente conglomerática, de tamaño de grano grueso a gránulos, de color gris crema a tonos pardo, pobremente calibrada, granos subredondeados de baja esfericidad, con alta presencia de fragmentos de roca. Composicionalmente se clasifica como arcosa lítica.



*Figura 36.* Fotografía de la muestra JD-3-4: arenisca muy gruesa conglomerática.

- Muestra JD-3-5: arenisca media, de tamaño de grano de medio a grueso, de color pardo con tonalidad crema y rojiza en superficie expuesta, pobre a moderadamente calibrado, granos son subredondeados esféricos. Composicionalmente se clasifica como arcosa lítica.



*Figura 37.* Fotografía de la muestra JD-3-5: arenisca media.

- Muestra JD-3-6: arenisca media de tamaño de grano de medio a grueso, de color gris crema con tonalidades rojizas en superficie expuesta, moderadamente calibrada, granos esféricos redondeados, con armazón granosoportado, matriz lodosa y cemento silíceo. Composicionalmente la muestra se clasifica como una arcosa lítica.



*Figura 38.* Fotografía de la muestra JD-3-6: arenisca media.

#### 4.4. Correlación de columnas estratigráficas

Para las columnas  $\Delta 1$ ,  $\Delta 2$  y  $\Delta 3$  se realizó una correlación topográfica, ubicándolas espacialmente como se evidencia en la *Figura 39*. Por otra parte, se elaboró una columna estratigráfica generalizada de la Fm. Bucaramanga, donde los rangos de los espesores para cada miembro incluyen la información reportada en la bibliografía, cuyas variaciones dependen del lugar donde fue medido (*Ver Figura 40*).

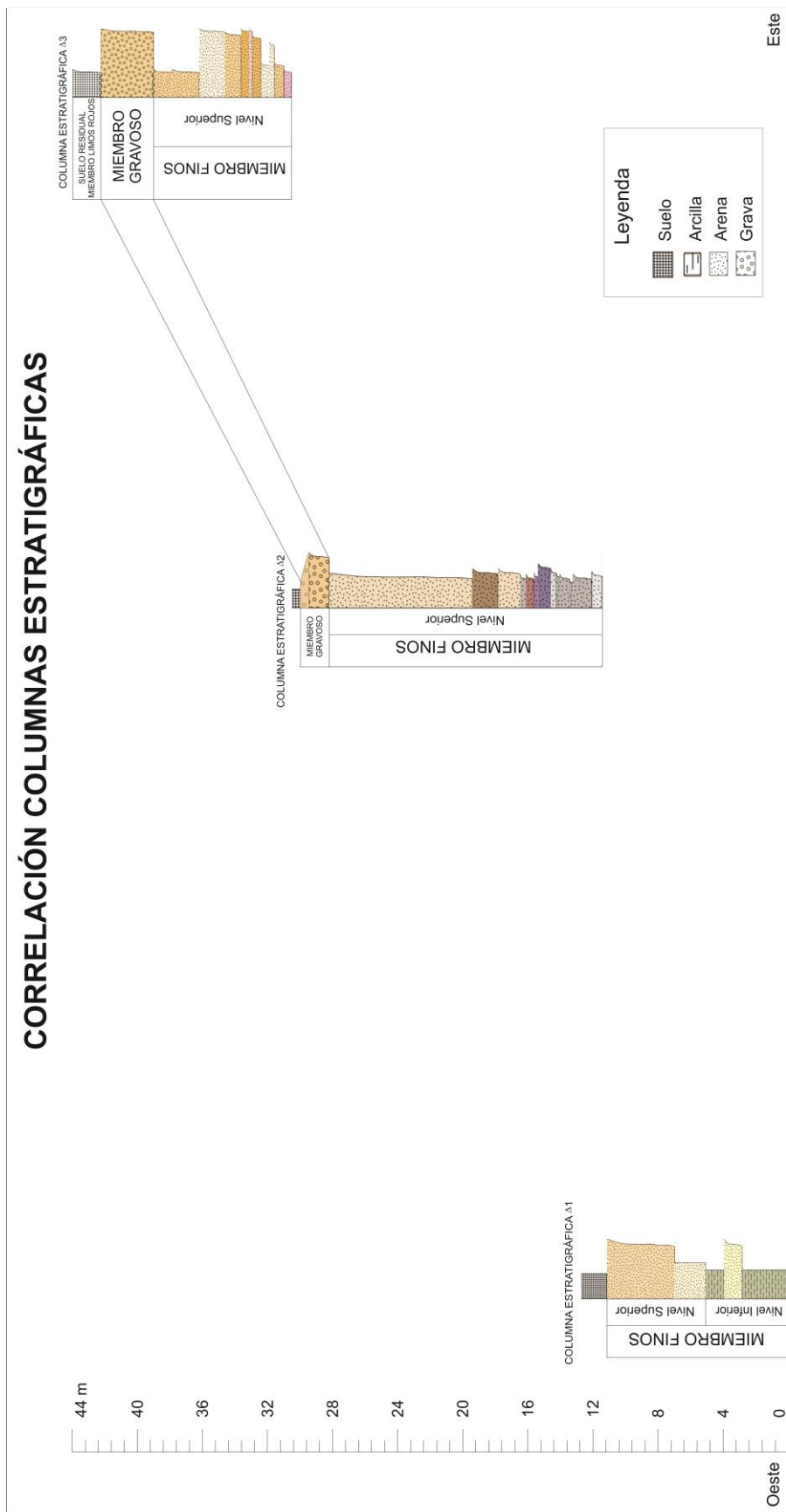


Figura 39. Correlación Topográfica de las Columnas Estratigráficas, con un espesor total de 42.5 m.

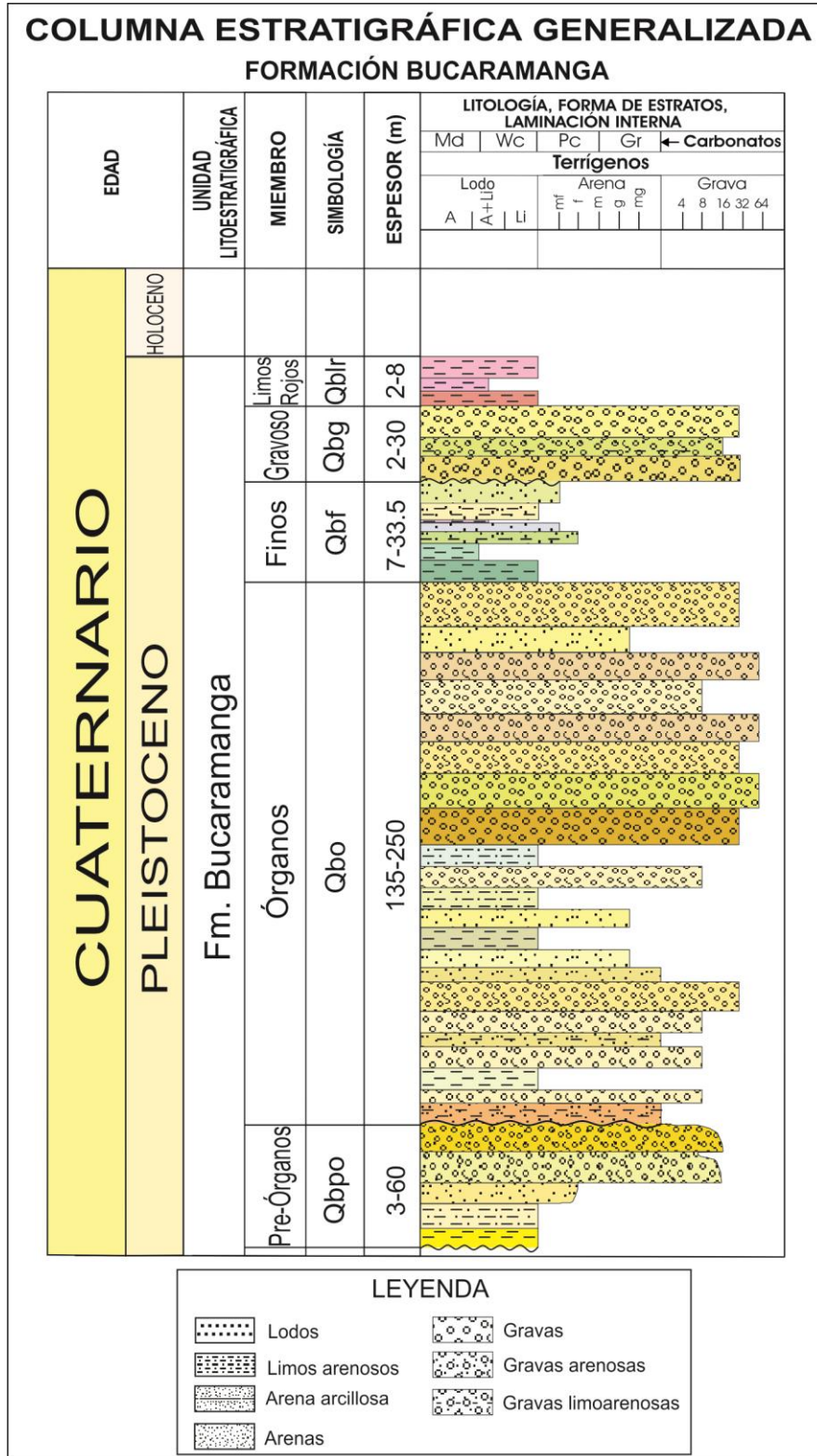


Figura 40. Columna Estratigráfica generalizada de la Fm. Bucaramanga, basada en recopilación bibliográfica.

**4.5. Análisis composicional de clastos**

Para el análisis composicional de clastos se realizó un conteo en el Miembro Gravoso, el cual aunque aflora en el tope de las columnas Δ2 y Δ3, únicamente hacia el tope del afloramiento Δ3 se presenta roca fresca apta para la medición, usando el método de cuadrícula, con una malla de 1m<sup>2</sup> y un total de 121 nodos. Al final se realizaron 17 grillas, para un total de 2057 nodos, de los cuales coincidieron 355 puntos, con los que se obtuvieron los siguientes resultados composicionales y texturales mostrados en la *Tabla 9, Figura 41, Figura 42 y Figura 43.*

Tabla 9

*Resultados del conteo de clastos por tipos composicionales*

Tipo de roca	Número de Malla																	Porcentaje Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Areniscas Silíceas	22	14	12	15	10	19	11	20	20	12	13	11	22	36	16	18	25	83.38%
Grano-diorita	3	2	2	2	1	1	3	1	3	0	1	1	0	4	3	2	2	8.73 %
Cuarzo	2	1	0	1	0	1	4	2	2	0	2	2	0	0	1	2	0	5.63 %
Monzo-granito	0	0	0	1	0	0	1	8	0	0	1	1	0	2	0	1	1	2.25 %
<b>Total de clastos / Malla</b>	<b>27</b>	<b>17</b>	<b>14</b>	<b>19</b>	<b>11</b>	<b>21</b>	<b>19</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>12</b>	<b>17</b>	<b>15</b>	<b>22</b>	<b>42</b>	<b>20</b>	<b>23</b>	<b>28</b>	<b>100 %</b>
<b>Total de Clastos</b>	<b>355</b>																	

Nota. Datos obtenidos en el conteo de clastos, se muestran las 17 mallas para el nivel F3, correspondiente a la base del Miembro Gravoso en el tope de la columna estratigráfica Δ3.

La litología en la cual se realizó el conteo corresponde a gravas matriz soportadas de color amarillo crema, que se asocian al Miembro Gravoso de la Fm. Bucaramanga. En el conteo realizado composicionalmente las gravas presentan en mayor proporción areniscas silíceas con 296 clastos (83.38%), seguido de granodiorita con 31 clastos (8.73%), cuarzo con 20 clastos (5.63%) y monzogranito con 8 clastos (2.25%) (Ver Tabla 9 y Figura 41).

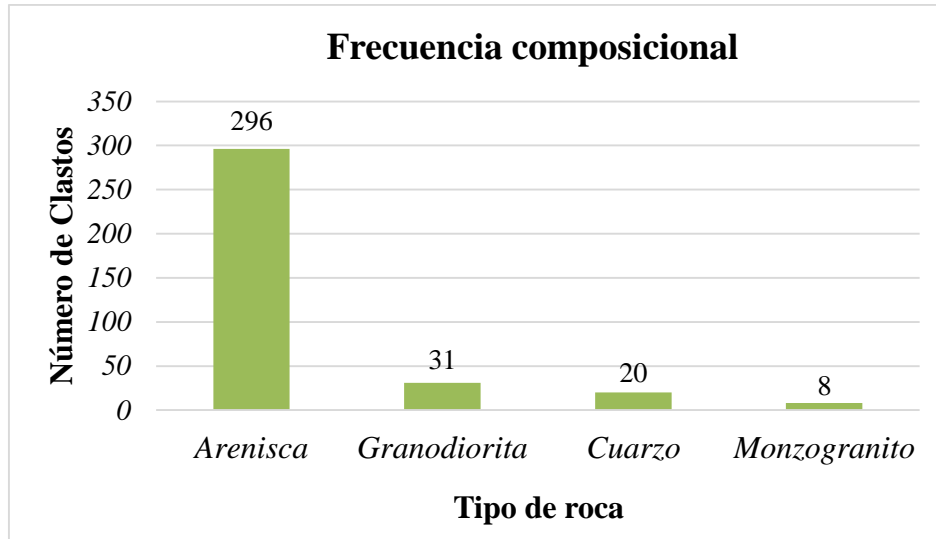


Figura 41. Histograma de frecuencia para la composición de los clastos de acuerdo con el tipo de roca.

A partir de la gráfica de distribución normal se puede reconocer que texturalmente el tamaño promedio de los clastos es de 53 m, lo que corresponde a guijas, los valores que toma van desde los 5 mm hasta los 142 mm, con una desviación estándar de 32 mm o  $-5\sigma$ , una moda de 25 mm y una mediana de 44 mm, obtenidas a partir de la distribución normal (Ver Figura 42). Este gráfico presenta una cola hacia la derecha (asimetría positiva), lo que se traduce en una mayor dispersión en los tamaños de los clastos de diámetro superior a la media.

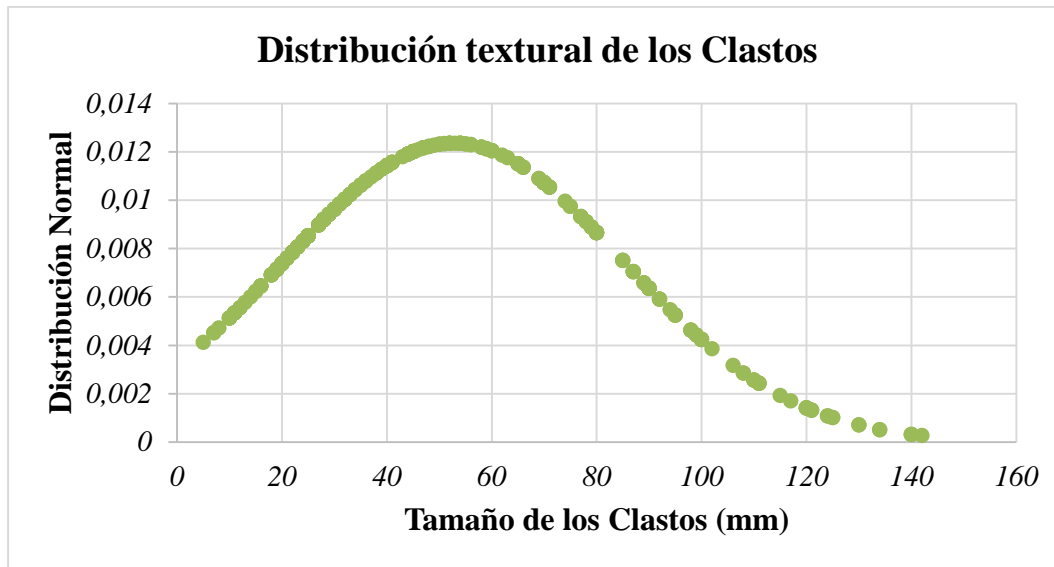


Figura 42. Distribución normal del tamaño de los clastos mostrando que la mayoría de los clastos se concentran entre 30 y 70 mm.

Mediante la función frecuencia se calculó el porcentaje de ocurrencia de tamaño de grano en los clastos analizados, obteniendo que el tamaño de grano predominante son las Guijas con 236 clastos que corresponde al 66.5%, seguidos de Guijarros con 118 clastos (33.2%), mientras que sólo un clasto corresponde a Gránulo (0.3%) (Ver Tabla 10 y Figura 43), además predominan los clastos subredondeados de baja esfericidad (Ver Tabla 11).

Tabla 10

Resultados de frecuencias texturales del conteo de clastos

Tamaño de grano	Intervalos (phi)	Intervalos (mm)	Límite Superior	Frecuencia	Porcentaje
Gránulo	-1 -2	2 - 5	5	1	0.3%
Guijas	-3 -5	6 - 64	64	236	66.5%
Guijarros	-5 -9	65 -142	142	118	33.2%
<i>Total</i>				<b>355</b>	<b>100%</b>

Nota. Datos de entrada de la gráfica de frecuencia para el tamaño de grano (Figura 43).

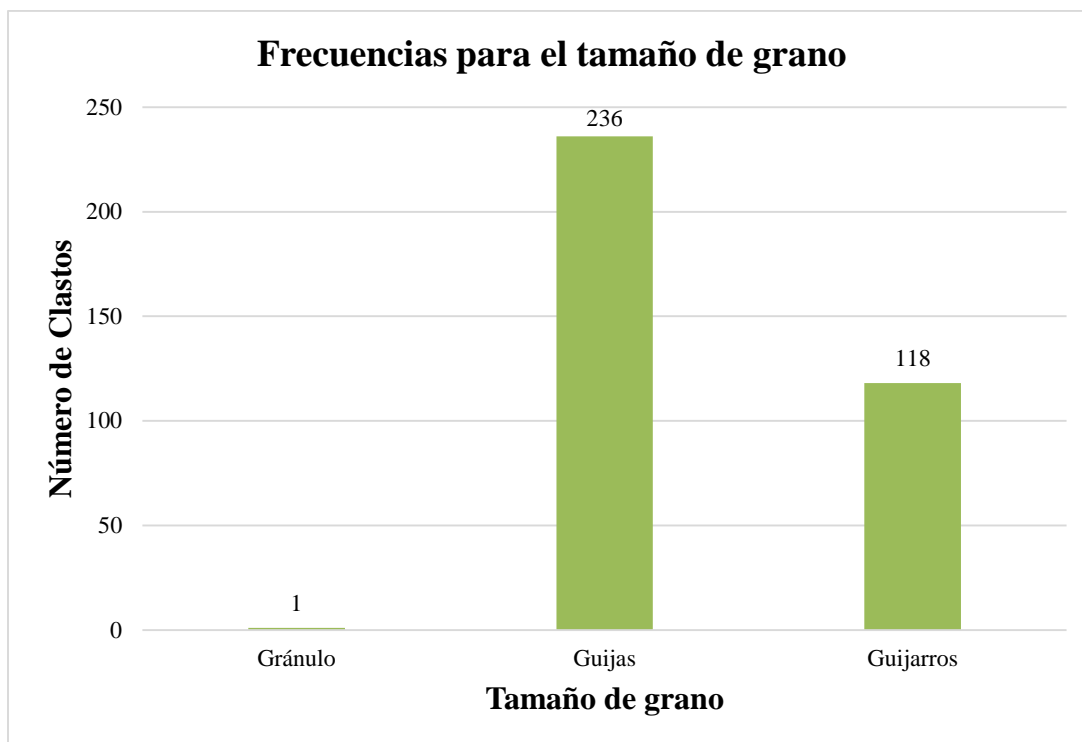


Figura 43. Histograma de frecuencia textural para los clastos analizados en el conteo.

Tabla 11

Resultados de redondez y esfericidad de los clastos analizados en el conteo

REDONDEZ	N° de Clastos
Angular	25
Subangular	41
Subredondeado	168
Redondeado	121
<b>TOTAL</b>	<b>355</b>

ESFERICIDAD	N° de Clastos
Alta	140
Baja	215
<b>TOTAL</b>	<b>355</b>

Nota. Datos de redondez y esfericidad de los clastos según Cruz 1991.

## 5. Discusión

Según Arche (2010, pp. 85-130), existen dos tipos de abanicos aluviales, considerados durante bastante tiempo como los dos modelos extremos de una variedad más amplia: los primeros son los abanicos aluviales de medio árido caracterizados por su pequeño tamaño, morfología radial casi perfecta y por estar constituidos predominantemente por la acumulación de diversos episodios de coladas de lodo y de detritos. Por otra parte, están los abanicos aluviales que han sido generados predominantemente mediante el concurso de corrientes acuosas, tractivas, que son capaces de transportar gran cantidad de sedimentos, con la particularidad de que éstos han sido acarreados por flujos acuosos con comportamiento newtoniano.

Sin embargo, éstos dos tipos de abanicos no son considerados como una panacea en la actualidad, ya que es bastante difícil distinguir, sólo por algunos tipos de facies, si se trata de depósitos originados por abanicos aluviales o por otros tipos de sistemas distributivos parecidos, como los ríos trenzados (braided) que transportan grandes cantidades de gravas (Arche, 2010, p. 87). Además, de acuerdo con Boggs (2006, pp. 246-248), el concepto de abanico aluvial sigue siendo controversial, ya que hace énfasis en la superficie geomorfológica, dado que, en el aspecto sedimentológico, los depósitos aluviales y fluviales no difieren considerablemente. No obstante, Blair & McPherson (1994) contradicen estas afirmaciones, al proponer cuatro criterios que permiten distinguir fácilmente los abanicos aluviales de otros ambientes sedimentarios en función de: - la morfología, - los procesos hidráulicos, - los procesos sedimentológicos y - las asociaciones de facies (Blair & McPherson, 1994, p. 450).

### 5.1. Ambiente Depositacional

Considerando la morfología del depósito como uno de los criterios diferenciadores entre abanicos aluviales y ríos trezados (Blair & McPherson, 1994), según Diederix et al. (2008) es generalmente aceptado que la Fm. Bucaramanga se trata de un gran cuerpo de sedimentos que tiene todas las características de un abanico aluvial desembocando del frente montañoso controlado por la Falla Bucaramanga. Argumentan que es muy llamativo el perfil transversal convexo y el perfil longitudinal ligeramente cóncavo, típico de la forma cónica de abanicos aluviales. No obstante, Solano (2016, p. 162) plantea que los sedimentos cuaternarios que existen al sur del río Frío, y que son considerados como abanico de Río Frío por Vargas (1993), corresponden a los mismos sedimentos ubicados al norte de dicho río y pertenecen a la Fm. Bucaramanga, tal y como consideraron en su momento Julivert (1958) y De Porta (1959). Entonces, teniendo en cuenta que la Fm. Bucaramanga se prolonga hacia el sur hasta la vereda Chocoa y Piedecuesta, no se conservaría la forma de cono característica de los abanicos aluviales (Solano, 2016, p. 163).

Otro de los criterios gira en torno a los procesos sedimentológicos y las asociaciones de facies (Blair & McPherson, 1994). Autores como Niño y Vargas (1992) interpretan sus facies como depósitos de corriente de canal y canales trezados con depósitos de flujos de lodo y de escombros para los segmentos Calcáreo, Órganos y Finos; flujos de escombros para el segmento Gravoso y flujos de lodo para el segmento Limos Rojos. Define el ambiente para toda la Fm. Bucaramanga como un abanico aluvial, ubicando cada miembro de acuerdo con su posición dentro del abanico.

Por otra parte, Franco & Ramírez (2018), a partir del levantamiento de secciones estratigráficas, sedimentología, observaciones de campo y recopilación bibliográfica, concluyen que la Fm. Bucaramanga se origina en una cuenca intramontana que obedece a un sistema fluvial trenzado, cuya configuración depende de las fluctuaciones en la energía del medio. Dichas fluctuaciones son generadas por controles alogénicos como el clima y la tectónica, causando variaciones en el sistema de depositación reflejadas en cada uno de sus miembros. A partir de sucesiones de facies definen los siguientes ambientes depositacionales para los miembros Órganos, Finos y Gravoso:

- Un sistema entrelazado somero de gravas (shallow gravel braided) para Órganos.
- Un sistema de río entrelazado efímero (flashy, ephemeral, sheetflood sand-bed river) para Finos, que refleja una disminución en la energía del medio.
- Un sistema entrelazado somero de gravas (shallow gravel braided) para Gravoso, que muestra un posible cambio en el régimen tectónico.

Sin embargo, Contreras & Osma (2018) proponen dividir el Miembro Órganos en dos segmentos: Inferior y Superior, cuya diferenciación radica en un ambiente de depositación aluvial para el segmento Órganos Inferior, de acuerdo con sus características texturales, con un dominio de gravas > 50% en el sector norte, en las cuales se llegan a tener bloques de hasta 1 m. Para el segmento Órganos Superior no plantean un ambiente de depositación, pues consideran que corresponde a lo ya propuesto anteriormente por Franco & Ramírez (2018).

En el presente documento se determinan los ambientes deposicionales (según Miall, 1996) para los miembros Finos y Gravoso, a partir de las facies obtenidas:

**Miembro Finos:**

- **Fm:** over bank, canal abandonado y drape deposits. Régimen que varía de un flujo bajo a aguas estancadas, se genera por la acumulación de partículas en suspensión por acreción vertical.
- **Sm:** flujo gravitatorio del sedimento. Depósitos de alta energía generados por dispersión en flujos concentrados, también puede ser producida por un evento postdeposicional, debido a intensa actividad biogénica, deshidratación o meteorización.
- **Sh:** plane bed flow (Critical flow). Régimen de flujo moderado a alto, laminar, unidireccional y turbulento. Puede depositarse en lechos, en planos o en eventos dinámicos como inundaciones.

**Miembro Gravoso:**

- **Gmg:** pseudoplastic debris flow (low strength, viscous).

Las facies mencionadas anteriormente pueden corresponder a flujos laminares para el Miembro Finos y flujos de escombros para el Miembro Gravoso, los cuales según Nichols (2009), pueden generarse en ambientes tanto de abanicos aluviales como de corrientes trenzadas de ríos distributarios.

De manera general, para estos dos miembros, se observa que la secuencia presenta una tendencia granocreciente y estratocreciente, lo cual según Arche (2010, p. 166), en una secuencia de

abanico aluvial, representa una actividad tectónica repetitiva que ocasiona la progradación de los abanicos; sin embargo, no es posible descartar la interpretación de un origen fluvial (Franco & Ramírez, 2018) para el Miembro Órganos o partes no descritas de la secuencia de Finos y Gravoso en este trabajo.

## 5.2. Marco Tectónico

El marco tectónico es fundamental para entender el proceso evolutivo que dio origen a la Formación Bucaramanga. Aunque en este trabajo no se planteó como un objetivo de estudio, se discute de manera general, centrándonos en la formación de la cuenca (*Ver Figura 14*).

Con base en la compilación y análisis de modelos tectónicos existentes (Julivert, 1958; De Porta, 1959; León, 1991; Niño & Vargas, 1992; Velandia, 2017) Mora & Galán (2019) proponen un modelo estructural de cuenca de tracción (pull-apart), producido por la interacción de dos fallas oblicuas entre sí, correspondientes a la Falla Bucaramanga con un comportamiento sinestral y la Falla Suárez con un movimiento dextral, generando así la apertura de la cuenca y por ende el espacio de acomodación para la depositación de la Formación Bucaramanga. Esta idea está de acuerdo con lo propuesto inicialmente por León (1991), Sin embargo, existen otros modelos que explican la apertura de la cuenca de formas distintas o complementarias: - Niño & Vargas (1992) dan más importancia a las fallas transversales que separan las “mesas” (Angelinos, de Ruitoque y Los Santos)(*Ver Figura 14*), - Contreras & Osma (2018) proponen el “pop-down” de Bucaramanga, mientras que - Velandia (2017) lo atribuye a la interacción de la Falla de Bucaramanga

con la Falla de Girón (dextral), la cual separa de la Falla de Suárez (inversa), generando una cuenca rotacional.

### **5.3. Proveniencia**

La discusión de esta temática se hace con base en los resultados de conteo de clastos en el Miembro Gravoso (no se realizó en el Miembro Finos por ausencia de suficiente material tamaño grava) y especialmente a partir de las observaciones sedimentológicas de los trabajos previos (Solano, 2016; Franco & Ramírez, 2018; Contreras & Osma, 2018). Cabe aclarar que solo fue posible realizar el conteo en un afloramiento con una extensión horizontal y densidad de clastos analizados más baja que los considerados por los demás autores. Los clastos se encontraban altamente meteorizados, en especial los clastos ígneos, donde el feldespato potásico ya estaba casi ausente. Estos factores podrían influir en las diferencias presentadas a continuación.

Al comparar los resultados obtenidos en el conteo de clastos realizado en la presente investigación con estudios previos realizados para el Miembro Gravoso, se evidencia correspondencia, ya que la mayoría de los autores, entre ellos Franco y Ramírez (2018, p. 108), quienes describen el Miembro Gravoso en un afloramiento ubicado en la ladrillera Bautista Cáceres, predio cercano al relleno sanitario El Carrasco, encontraron que la composición de los clastos es predominantemente sedimentaria, principalmente arenitas blancas silíceas (68%) y areniscas glauconíticas (20%), seguidos por rocas metamórficas (cuarcitas) (9%), granitos-riolitas (2%) y sedimentarias rojas (>2%). Este estudio concuerda en que el conteo de clastos arroja principalmente areniscas silíceas (83.38%); sin embargo, no se observó la presencia de areniscas glauconíticas, con las cuales

Franco y Ramírez (2018) sustentan la hipótesis de una unidad fuente únicamente del Cretácico, como la Fm. Aguardiente, y el porcentaje de clastos ígneos en nuestro caso es mayor (~11%).

El hecho que más del 80% de los clastos sean de areniscas blancas silíceas, descarta la posibilidad que estos provengan del Miembro Finos, situación que sería la más probable estratigráficamente en un ambiente fluvial, ya que por ser predominantemente guijas subredondeadas de baja esfericidad, implican un transporte de media a alta energía de distancia corta. Además, dichos clastos se encuentran bien cementados y presentan resistencia a la erosión, mientras que el Miembro Finos no presenta litificación. En cambio, las características litológicas de dichos clastos se asemejan a las areniscas cuarzosas claras, pardas y rojizas de la Fm. Los Santos; además, se hallaron clastos que incluyen limolitas rojizas que se asemejan a las limolitas encontradas en las formaciones Jordán y Girón.

No obstante, según Solano (2016), la abundancia de rocas sedimentarias terrígenas (claras y rojizas), así como cuarzo, neis y granito blanco, aunque presentan porcentajes importantes, afloran en toda el área oriental de la Meseta de Bucaramanga y en las cuencas ubicadas al sureste y noreste de la misma, por lo cual no son determinantes al momento de identificar el área fuente principal de los sedimentos.

Dado que los cambios en la composición de los clastos pueden indicar la evolución tectónica del área fuente a lo largo del tiempo (Arche, 2010, p. 191), basados en los resultados anteriormente expuestos podemos pensar que la variación composicional de los clastos en el Miembro Gravoso puede deberse a cambios tectónicos en el área fuente o a aportes de sedimentos desde diferentes

áreas fuente. Diederix et al. (2008) afirma que el régimen hidrográfico registra una fase de fuerte encañonamiento de los ríos Sogamoso y Lebrija, cuyo proceso de incisión y erosión regresiva, en el caso del río Sogamoso ha conllevado a las capturas de los ríos Suárez y Chicamocha, además el actual río de Oro es en realidad la parte descabezada del original río Suárez. Todo esto hace evidente que la fuerte incisión de los ríos principales desencadenó una serie de eventos que resultaron en un avance de la erosión, inclusive en el desvío del Río Suratá de su posición fija en el ápice del Abanico. Es bien probable que esta fase de fuerte incisión durante el Pleistoceno Tardío haya tenido su origen en procesos de activación tectónica a nivel regional y que deben tener implicaciones para el potencial sismogénico de las fallas Bucaramanga y Suárez (Diederix et al., 2008, pp. 80-81).

Se ha planteado que ha sido el río Suratá quien aportó el material para la edificación de este abanico (Niño & Vargas, 1992). Sin embargo, debido al confinamiento en una cuenca tectónica delimitada por fallas activas con escarpes que actúan como barrera, no alcanzó a desarrollarse la forma típica semicircular característica de los abanicos (Diederix et al., 2008, pp. 29-32). Al mismo tiempo, se observa que no hay incisión del ápice por un drenaje con origen en el macizo (“fanhead incisión”). Normalmente una situación en la que hay incisión del ápice se toma como un indicio de la disminución o cese del levantamiento de un frente montañoso. En el presente caso no hubo un cese de levantamiento en el escarpe, lo que sí ocurre es un cese de aporte de material para alimentar el abanico, causado por la eliminación (desplazamiento) de su fuente. Se trata aquí de una migración constante del ápice de un abanico y un crecimiento del Abanico hacia el norte (Diederix et al., 2008, pp. 76).

Por otra parte, Tesón et al. (2015) proponen que inicialmente los ríos Suárez y Chicamocha confluían al sur de Bucaramanga, siendo los responsables de la terraza sobre la cual se asienta la ciudad. Esta antigua red de drenaje estaba condicionada por estructuras tectónicas, como la Falla de Suárez (determina el trazado inicial del río con el mismo nombre) y la Falla de Bucaramanga (marcando el trazo del río Chicamocha), hasta que fue modificada por un proceso de captura generado a partir de la erosión remontante de los antiguos ríos proto-Sogamoso y proto-Lebrija, que discurrían transversales a las estructuras, dejando sin alimentación importante a la Terraza de Bucaramanga, lo que explica su localización actual desconectada de grandes cauces fluviales y su amplia distribución geográfica.

Solano (2016) relaciona las unidades litoestratigráficas presentes en las cuencas de drenaje de los ríos que están asociados con el origen de la Fm. Bucaramanga (Chicamocha, Sogamoso, Suratá, de Oro, Frío y del Hato). A partir de comparar las litologías recolectadas en campo y la relación planteada anteriormente, establece las cuencas de los ríos Chicamocha y Sogamoso como área fuente principal del depósito cuaternario, pues considera que dichas cuencas contienen el total de las litologías identificadas mediante petrografía en los clastos colectados. Las litologías indicadoras de proveniencia corresponden a granito rosado, riolita, pegmatita y arenisca con glauconita, pues sólo están presentes en estas dos cuencas. También es importante reconocer los aportes en dirección este-oeste por los ríos Frío, del Hato y principalmente Suratá que fluyen a través de la meseta desembocando en el río de Oro. Por tanto, estos aportes pudieron interdigitarse con el flujo principal de sedimento en sentido sur-norte (Solano, 2016, p.156).

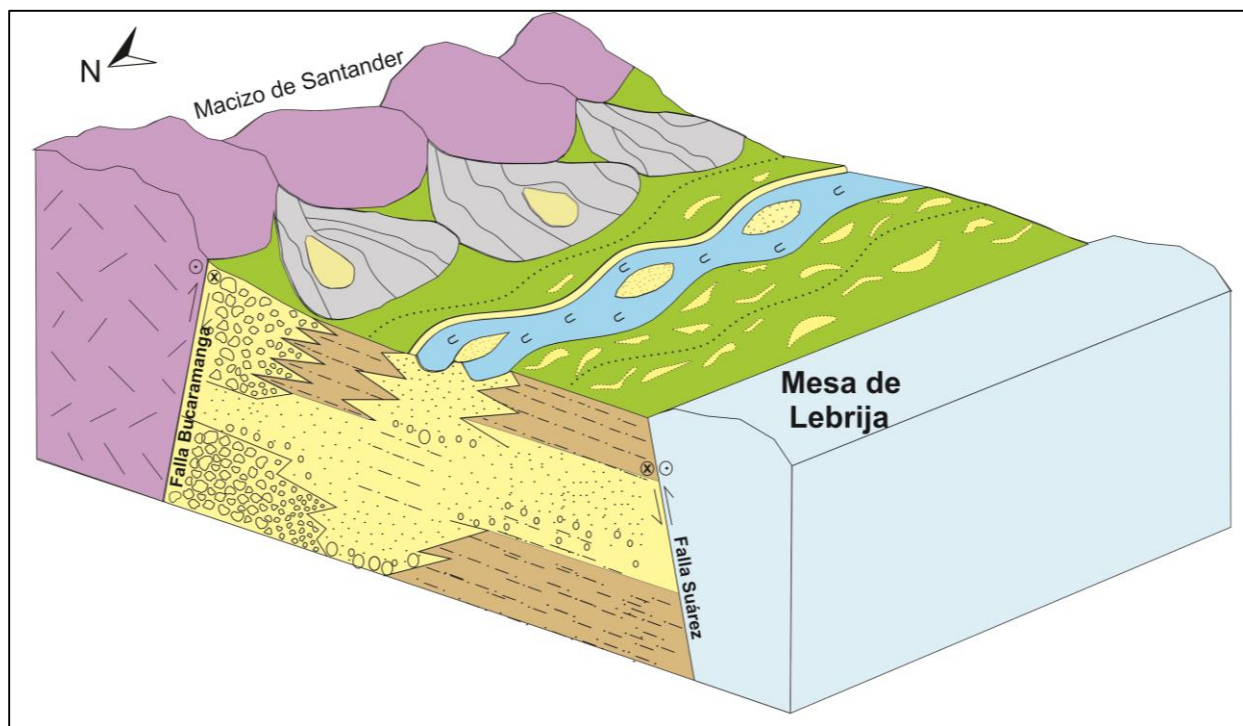
Franco y Ramírez (2018, pp. 118-119) basados en datos de paleocorrientes (medidos en canales con dirección N-S y en planos de imbricación con sentido SW-NE y SE-NW), y en la correlación de las arenitas glauconíticas (clasificadas como cuarzoarenitas glauconíticas con circón y turmalina) con rocas propuestas para la Fm. Aguardiente, la cual tiene influencia en las paleocuenas ubicadas al sur del Área Metropolitana, proponen para gran parte de los clastos que componen el depósito de la Fm. Bucaramanga un área fuente al SE de la zona de estudio, en la paleocuenca del Río Chicamocha.

Por otra parte, Contreras & Osma (2018) identifican para el segmento Inferior del Miembro Órganos clastos de origen ígneo y metamórfico que asocian al Macizo de Santander, asignando su proveniencia a las microcuenas de las quebradas La Mala y El Aburrido, lo cual difiere totalmente para el segmento Superior.

Finalmente, observando las características típicas que Blair & McPherson (1994) proponen para definir entre abanicos aluviales y ríos trezados, resalta la morfología del depósito, que según las observaciones de Diederix et al. (2008) coinciden plenamente con un abanico aluvial desembocado del río Suratá. No obstante, autores como Franco y Ramírez (2018), basados en asociaciones de facies típicas de braided, mediciones de paleocorrientes en sentido NW-SE, y Solano (2016) relacionando los clastos analizados y su procedencia con las paleocuenas Sogamoso-Chicamocha, proponen un ambiente de sistema fluvial trezado.

En general las posturas planteadas hasta la actualidad consideran un solo ambiente durante todo el periodo de depositación de la Fm. Bucaramanga, en este documento se considera que es posible

que durante la etapa de desarrollo del depósito se presenten dos ambientes deposicionales (abanico aluvial y río trenzado) donde interactúan: - la exhumación del macizo y el desplazamiento lateral por la Falla Bucaramanga, que generan el aporte aluvial y una mayor disposición de sedimento al exponer el área fuente, posteriormente transportado por cauces transversales. - El curso longitudinal del río “paleo Chicamocha” recostado al borde de la cordillera transcurriendo por una cuenca tectónica, transportando y depositando gran cantidad de material, con una llanura aluvial que varía acercándose y alejándose del piedemonte, a medida que se va rellenando la cuenca. Por lo tanto, consideramos que es más acertado asignar un ambiente deposicional enmarcado dentro de estas variaciones en el sistema fluvial-aluvial, tal y como se muestra en la Figura 44.



*Figura 44.* Bloquediagrama simplificado mostrando el posible ambiente de depósito para la Fm. Bucaramanga.

## 6. Conclusiones

Dentro del área correspondiente al relleno sanitario El Carrasco se identificaron los Miembros Órganos, Finos y Gravoso de la Formación Bucaramanga; el Miembro Órganos fue cartografiado a partir de sus características litológicas, relaciones de campo y altura. Con respecto al Miembro Finos texturalmente presenta dos niveles separados a partir de facies: Fm a la base, y Sm y Sh al tope, con un espesor total de 33.5 m. Suprayaciendo esta unidad aflora el Miembro Gravoso compuesto de facies Gmg, con un espesor de hasta 4 m; la composición de los clastos es predominantemente areniscas silíceas que se correlacionan en este trabajo con la Fm. Los Santos. Al tope de la secuencia se identificó suelo residual del Miembro Limos Rojos, con espesores variables, que llegan hasta un metro, altamente meteorizado y con desarrollo de suelo.

En lo que respecta al origen de la Formación Bucaramanga, a partir de los resultados obtenidos en este trabajo, es incorrecto dar una postura definitiva acerca del ambiente de depósito para toda la formación, o de cuál es el drenaje asociado a la depositación. Sin embargo, considerando las características diferenciadoras entre abanicos y ríos trenzados, como son: morfología del depósito, sedimentología y asociación de facies (Blair & McPherson, 1994), la Fm. Bucaramanga presenta una morfología típica de abanico aluvial (Diederix et al., 2008), por lo menos para los Miembros Superiores (Finos?, Gravoso y Limos Rojos); por otro lado, las asociaciones de facies indican depósitos de río trenzado (Franco & Ramírez, 2018). Teniendo en cuenta las mediciones de paleocorrientes en sentido N-S, SW-NE y SE-NW (Franco & Ramírez, 2018) y las relaciones litológicas

clastos-unidades litoestratigráficas aflorantes en las cuencas de drenajes asociados a la deposición, los sedimentos que componen la Fm. Bucaramanga provienen principalmente de los paleocauces Sogamoso y Chicamocha (Solano, 2016), con presencia de aportes laterales desde el Macizo de Santander, por parte de los ríos Suratá, Frío, y del Hato, que desembocan en el río de Oro.

## **7. Recomendaciones**

Mejorar el conocimiento geológico de la Formación Bucaramanga, a partir de estudios más detallados y métodos geofísicos que permitan entender la configuración del paleo-relieve bajo toda la zona que cubre dicha formación. En especial sus miembros Finos y Gravoso descritos en este documento, pero sobre los cuales aún queda mucho que estudiar, con el fin de delimitar con claridad la base y el tope de ellos, variaciones litoestratigráficas en otras regiones donde aflora y su ambiente de depósito de forma más clara.

Enfocar proyectos de investigación que tengan como finalidad hacer un registro detallado de la variación textural y composicional de los clastos en toda el área que abarca la Fm. Bucaramanga, para observar los cambios en el aporte de sedimentos y en su área fuente.

## Referencias

- Alcaldía de Bucaramanga. (2016). *Actualización Plan De Gestión Integral De Residuos Sólidos PGIRS 2016-2027*. Desarrollo sostenible, Bucaramanga. Obtenido de [http://www.bucaramanga.gov.co/laruta/download/plan\\_integral\\_de\\_residuos\\_solidos/PGIRS-BUCARAMANGA-2016-2027.pdf](http://www.bucaramanga.gov.co/laruta/download/plan_integral_de_residuos_solidos/PGIRS-BUCARAMANGA-2016-2027.pdf)
- Arche, A. (2010). *Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Arévalo Avendaño, J. M., & Rincón Duarte, M. A. (2016). *Análisis sedimentológico del miembro Pre-Órganos (Calcáreo) en el abanico aluvial de Bucaramanga (Sección Río de Oro - Girón)*. Bucaramanga, Santander, Colombia: Tesis de Grado para optar al título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.
- Boggs, J. (2006). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy Fourth Edition*. (M. P. Company, Ed.) New Jersey: Pearson Education. Obtenido de <https://raregeologybooks.files.wordpress.com/2015/03/principles-of-sedimentology-and-stratigraphy-by-sam-jr-boggs.pdf>
- Bueno Balaguer, E. L., & Solarte Vanegas, A. M. (1994). *Geología, Geotecnia y comportamiento erosivo del área de reserva forestal de Bucaramanga*. Bucaramanga, Santander, Colombia: Tesis de Grado para optar al título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología. Obtenido de <http://tangara.uis.edu.co:8080/visualizadorTesis/?parametros=79103>

- C.D.M.B, & Geotecnología Ltda. (2005). *Documento de diagnóstico Amenazas de inundación y erosión del Río de Oro* (Vols. 0. Introducción - 1. Geología y Geotecnia - 2. Meteorología). Bucaramanga, Santander, Colombia.
- Carrillo Lombana, E., & Vergara S, H. (2002). *Neotectónica Y Fallas Activas Del Nororiente Colombiano*. INGEOMINAS.
- Contreras Moreno, J. C., & Osma Duarte, Á. S. (2018). *Caracterización del segmento Órganos Inferior en el Miembro Órgano (Formación Bucaramanga) en el Norte de Bucaramanga*. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.
- De Porta, J. (1959). *La Terraza de Bucaramanga* (Vol. 3). Bucaramanga: Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander.
- Diederix, H., Hernández Moreno, C., Torres Jaimes, E. M., & Botero Santa, P. A. (2008). *Un Modelo de evolución Morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de fallas en la región de Bucaramanga*. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS - Subdirección de Geología básica.
- Etayo Serna, F. (1985). *Análisis facial del inicio del avance marino del Cretácico en la región SW del Macizo de Santander*. Bogota, D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Fernández-Lozano, J., & Gutiérrez-Alonso, G. (2016). APLICACIONES GEOLÓGICAS DE LOS DRONES. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 89-105.

- Franco Corredor, M. A., & Ramírez Arévalo, A. M. (2018). *Reconstrucción Paleoambiental de los Miembros Órganos, Finos y Gravoso de la Formación Bucaramanga en el Área Metropolitana de Bucaramanga*. Santander. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.
- García González, Y. C., & Añez Medina, M. (2017). *Evolución Reciente de los Drenajes de los Ríos Chicamocha y Suárez*. Santander. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.
- Garnica Suarez, A. F., & Niño Pinto, L. G. (2015). *Caracterización Sedimentológica del Segmento Órganos de la Formación Bucaramanga en el Sector del Anillo Vial del Municipio de Girón Departamento de Santander*. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.
- Graham, S. A., Tolson, R. B., Decelles, P. G., Ingersoll, R. V., Bargar, E., Caldwell, M., . . . White, J. (1986). Provenance modelling as a technique for analysing source terrane evolution and controls on foreland sedimentation. *Spec.Publs int. Ass. Sediment*, 8, 425-436. doi:10.1002/9781444303810.ch23
- Howard, J. (1993). Las estadísticas de contar clastos en ruditos: una revisión, con ejemplos del Alto Paleógeno del sur de California, EE. UU. *Sedimentología*, 40 (2), 157-174.
- Huggett, R. J. (2007). *Fundamentals of Geomorphology* (Third ed.). (J. Gerrard, Ed.) London and New York: Routhledge, Taylor y Francis Group. Obtenido de [https://sudartomas.files.wordpress.com/2012/11/fundamentalsofgeomorphology\\_routledg efundamentalsophysicalgeography.pdf](https://sudartomas.files.wordpress.com/2012/11/fundamentalsofgeomorphology_routledg efundamentalsophysicalgeography.pdf)

- Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS. (2001). *Zonificación Sismogeotecnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga*. Bogotá: Subdirección de Amenazas Geoambientales.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS. (2010). *Interpretación geológica e Hidrogeológica del centro de Santander*. Bogotá: Memoria.
- Jiménez , G., Speranza, F., Faccenna, C., Bayona, G., & Mora, A. (2015). Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial fan: Evidence for a 3 slip rate or the Bucaramanga-Santa Marta Fault, Colombia. *Elsevier*, 57, 12-22. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2014.11.001>
- Julivert, M. (1958). *La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S. A.)* (Vol. 1). Bucaramanga: Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander.
- Julivert, M. (1963). *Nuevas Observaciones sobre la Estratigrafía y Tectónica del Cuaternario de los Alrededores de Bucaramanga* (Vol. 15). Bucaramanga: Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander.
- León Silvestre, L. A. (1991). Mapa Geológico de Santander. *Boletín de Geología*, 20(35), 53-63.
- Lima Amara, M. C., & Medina Ramos, J. D. (2015). *Evolución Climática Registrada y Estratigrafía del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.
- Losada Liste, R. (31 de Julio de 2019). *Geogebra*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2019, de Instituto GeoGebra de Cantabria : [http://geogebra.es/cvg\\_primaria/05/html/mediana.html](http://geogebra.es/cvg_primaria/05/html/mediana.html)

- Mantilla Figueroa, L. C., García Ramírez, C. A., & Valencia, V. (2016). Nuevas evidencias que soportan la escisión de la formación Silgará y propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia). *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 320-336. doi:<http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.303>
- Mantilla-Figueroa, L. G.-R. (2016). Propuesta de escisión de la denominada 'Formación Silgará' (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38 (1): 33-50. doi:<http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016002>
- Minitab*. (2018). Recuperado el 25 de Noviembre de 2019, de Soporte de Minitab18, temas de apoyo: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/>
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy - Second Edition*. Chichester, West Sussex. UK: Wiley-Blackwell.
- Niño, A. E., & Vargas P, G. (1992). *Geología y Geotecnia de la escarpa Noroccidental de la Meseta de Bucaramanga*. Bucaramanga, Santander, Colombia: Tesis de Grado para optar al título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología. Obtenido de <http://tangara.uis.edu.co:8080/visualizadorTesis/?parametros=74781>
- Plata Guerrero, C. L., & Moreno Ruiz, S. N. (2015). *Estudio sedimentológico del Miembro Órganos en la Formación Bucaramanga, hacia el escarpe occidental en las estribaciones del municipio de Girón*. Bucaramanga, Colombia: Tesis de Grado para optar al título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.

- Royero Gutiérrez, J. M., & Clavijo, J. (2001). Memoria Explicativa del Departamento de Santander. En INGEOMINAS, *Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander*. Bogotá D.C., Colombia : Publicación Digital Ingeominas .
- Selley, R. (2000). *Applied Sedimentology Second Edition*.
- Solano Ávila, L. A. (2016). *Estudio de Proveniencia de los Sedimentos de la Formación Bucaramanga, al sur Río Frío; en los Municipios de Floridablanca y Girón, Santander*. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., & Beate, B. (2015). The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). *Gondwana Research, Volumen 27, Número 1*, 95-139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.004>
- Torres Jaimes, E. M. (2017). *Génesis de terrazas cuaternarias del sistema fluvial del río Pamplonita entre Chinácota y Cúcuta (Norte de Santander): determinación de los controles tectónicos, climáticos y litológicos*. Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias. Bogotá D.C: Tesis de Grado para optar al título de Magister en Ciencias - Geología, Universidad Nacional de Colombia.
- Tucker, M. (2003). *Sedimentary Rocks in the field - Third Edition*. Department of Geological Sciences University of Durham, UK.
- Velandia, F. A. (2017). *Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias.

Geociencias, Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Doctorado en Geociencias.

Vera Torres, J. A. (1994). *ESTRATIGRAFÍA. Principios y métodos*. Madrid, Alcorcón: Rueda.

Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz B., J., & Restrepo A., H. (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona Departamento de Santander. En INGEOMINAS, *Mapa Geológico de Colombia* (Vols. N° 1 -3 , pág. 132). Bogotá, D.C., Colombia : Boletín geológico .