

Evidencias de actividad tectónica reciente en los depósitos de la Formación Bucaramanga

Elber Esneider Figueroa Blanco

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Francisco A. Velandia P.

PhD. Geociencias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico - Químicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

A mis padres Delsa Blanco y Luis Alfonso Figueroa, por su amor incondicional, su apoyo constante, su paciencia y por enseñarme con el ejemplo, que, con determinación y esfuerzo  
ningún sueño es imposible.

A mis hermanos Fernando, Ximena, Diego y Estefanía por su cariño, por las risas compartidas y por estar siempre presentes sin condiciones.

A Carolina Jaimes Escobar por su paciencia, su comprensión, por ser mi refugio en los días difíciles y la fuerza que me impulsa a seguir adelante cuando más lo necesito.

### **Agradecimientos**

Agradezco sinceramente a mi director de trabajo de grado, Francisco Velandia por su valiosa orientación, paciencia y compromiso a lo largo de este proceso, por ser un excelente maestro y un ejemplo a seguir como profesional.

Al profesor Guillermo Vargas por su tiempo y disposición durante el proceso de recolección de datos.

A los profesores de la escuela de geología que compartieron su conocimiento y experiencia en pro de la formación de nuevos profesionales.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarme una formación académica de calidad, un entorno enriquecedor y las herramientas necesarias para crecer tanto como profesional como personalmente.

Agradezco a Ecopetrol por la oportunidad brindada a través del Programa Bachilleres Ecopetrol “Mario Galán Gómez”, el cual fue fundamental para el desarrollo de mi formación académica, siendo no solo un apoyo económico sino una motivación constante.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	13
Justificación .....	14
1. Localización zona de estudio.....	15
2. Objetivos.....	17
2.1 Objetivo General .....	17
2.2 Objetivos Específicos .....	17
3. Marco geológico .....	17
3.1 Estratigrafía.....	17
3.1.1 Miembro Pre-Órganos .....	19
3.1.2 Miembro Órganos.....	20
3.1.3 Miembro Finos .....	20
3.1.4 Miembro Gravoso.....	21
3.1.5 Miembro Limos Rojos.....	21
3.2 Geología estructural .....	22
3.2.1 Falla de Bucaramanga .....	23
3.2.2 Falla del Suárez .....	24
3.2.3 Falla del Río de Oro .....	24
4. Metodología.....	25
4.1 Fase I: Recopilación bibliográfica .....	25
4.2 Fase II: Trabajo de campo .....	26
4.3 Fase III: Trabajo de oficina.....	27

4.4 Fase IV: Elaboración del informe final .....	27
5. Resultados.....	28
5.1 Modelos geológicos del Abanico de Bucaramanga .....	28
5.1.1 Modelo generado con base en Julivert (1958) .....	28
5.1.2 Modelo planteado por Niño & Vargas (1992) .....	29
5.1.3 Modelo generado con base en Rossello et al. (2011) .....	30
5.1.4 Modelo generado con base en Clavijo & Vargas (2017).....	31
5.1.5 Modelo generado con base en Velandia (2017).....	32
5.2 Afloramientos visitados en la zona de estudio.....	34
5.3 Evidencias de actividad tectónica .....	36
5.3.1 Evidencias en la zona norte.....	36
5.3.1 Evidencias en la zona centro.....	41
5.3.1 Evidencias en la zona sur.....	44
5.4 Análisis de lineamientos geológicos .....	45
5.4.1 Análisis de lineamientos en la zona norte.....	46
5.4.2 Análisis de lineamientos en la zona centro.....	48
5.4.3 Análisis de lineamientos en la zona sur.....	49
5.5 Planteamiento de fallas geológicas .....	50
5.5.1 Falla Parque Industrial II .....	51
5.5.2 Falla La Cemento .....	52
5.5.3 Falla Quebrada La Picha.....	53
5.5.4 Falla Centro Abastos .....	54
5.5.5 Falla Parque El Gallineral.....	55

5.6 Análisis de datos estructurales .....	56
5.6.1 Zona norte .....	56
5.6.2 Zona centro .....	58
5.6.3 Zona sur .....	60
5.7 Modelo estructural.....	62
6. Discusión .....	64
7. Conclusiones.....	66
8. Recomendaciones.....	67
Referencias Bibliográficas.....	69
Apéndices .....	74

**Lista de Tablas****Pág.**

Tabla 1 <i>Recopilación del estado del arte. Estratigrafía de la Formación Bucaramanga</i> .....	18
--	----

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Localización zona de estudio</i> .....	15
Figura 2 <i>Modelo elaborado según lo descrito por Julivert (1958)</i> .....	28
Figura 3 <i>Modelo planteado por Niño &amp; Vargas (1992)</i> .....	29
Figura 4 <i>Modelo elaborado según lo descrito por Rossello et al. (2011)</i> .....	30
Figura 5 <i>Modelo elaborado según lo descrito por Clavijo &amp; Vargas (2017)</i> .....	32
Figura 6 <i>Modelo elaborado según lo descrito por Velandia (2017)</i> .....	33
Figura 7 <i>Mapa de estaciones de campo realizadas en la zona de estudio</i> .....	34
Figura 8 <i>Evidencia de tectónica durante el depósito de la Formación Bucaramanga</i> .....	36
Figura 9 <i>Evidencia de tectónica al costado de la vía Barrio Café Madrid</i> .....	37
Figura 10 <i>Panorámica de afloramiento con diaclasas y estrías de falla</i> .....	38
Figura 11 <i>Contacto de la Formación Tiburón y el miembro Órganos</i> .....	39
Figura 12 <i>Capa arcillo arenosa con planos estriados</i> .....	40
Figura 13 <i>Falla que corta depósitos cuaternarios</i> .....	42
Figura 14 <i>Plano de falla pulido y estriado</i> .....	43
Figura 15 <i>Afloramiento al costado del Anillo Vial sector Plaza San Juan</i> .....	44
Figura 16 <i>Afloramiento al borde del río, barrio Brisas del río Frio</i> .....	45
Figura 17 <i>Lineamiento Parque Industrial II</i> .....	46
Figura 18 <i>Lineamiento barrio Café Madrid</i> .....	47
Figura 19 <i>Lineamiento Quebrada La Picha</i> .....	48
Figura 20 <i>Lineamiento codo Río de Oro sector Centro Abastos</i> .....	49
Figura 21 <i>Lineamiento codo Río de Oro sector Parque El Gallineral</i> .....	50

Figura 22 <i>Falla Parque Industrial II</i> .....	51
Figura 23 <i>Falla La Cemento</i> .....	52
Figura 24 <i>Falla Quebrada La Picha</i> .....	53
Figura 25 <i>Falla Centro Abastos</i> .....	54
Figura 26 <i>Falla Parque El Gallineral</i> .....	55
Figura 27 <i>Diagrama de rosa de los datos de diaclasas tomados en la zona norte</i> .....	57
Figura 28 <i>Diagrama de densidad de polos determinado para la zona norte</i> .....	57
Figura 29 <i>Tensor de esfuerzo determinado a partir de los planos estirados en la zona norte</i> ....	58
Figura 30 <i>Diagramas de rosa determinados a partir de los planos estirados en la zona norte</i> ..	58
Figura 31 <i>Diagrama de rosa de los datos de diaclasas tomados en la zona centro</i> .....	59
Figura 32 <i>Diagrama de densidad de polos determinado para la zona centro</i> .....	59
Figura 33 <i>Tensor de esfuerzo determinado para la zona centro</i> .....	60
Figura 34 <i>Diagramas de rosa determinados a partir de los planos estirados en la zona centro</i>	60
Figura 35 <i>Diagrama de rosa de los datos de diaclasas tomados en la zona sur</i> .....	61
Figura 36 <i>Diagrama de densidad de polos determinado para la zona sur</i> .....	61
Figura 37 <i>Tensor de esfuerzo determinado para la zona sur</i> .....	62
Figura 38 <i>Diagramas de rosa determinados a partir de los planos estirados en la zona sur</i> .....	62
Figura 39 <i>Modelo estructural vista desde el SW</i> .....	63
Figura 40 <i>Modelo estructural vista desde el W</i> .....	64

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Tabla de datos de campo.....	74

## Resumen

**Título:** Evidencias de actividad tectónica reciente en los depósitos de la Formación Bucaramanga\*

**Autor:** Elber Esneider Figueroa Blanco\*\*

**Palabras Clave:** Formación Bucaramanga, Abanico aluvial, Sedimentos, Tensor de esfuerzos.

**Descripción:** El análisis del contexto estructural del área metropolitana de Bucaramanga, ubicada en una depresión morfológica delimitada por las fallas de Bucaramanga y del Suárez, ha sido objeto de numerosos estudios geológicos para comprender la evolución de su cuenca sedimentaria. Esta investigación busca integrar y correlacionar los aportes de distintos autores mediante la recopilación y análisis de datos de campo en diversos afloramientos de la región. Para ello, se elaboraron bocetos de los modelos geológicos existentes, evaluando su validez en la formación y evolución de la cuenca. Con el apoyo de imágenes satelitales, se planificaron visitas de campo en 50 estaciones, permitiendo la identificación de cinco fallas en la zona norte y occidental del área de estudio: la Falla Parque El Gallineral, la Falla Centro Abastos, la Falla Parque Industrial II, Falla Quebrada La Picha y la Falla La Cemento. Estas estructuras están directamente relacionadas con la evolución geodinámica y la actividad tectónica reciente de la región, además de aportar información clave sobre los cambios en la hidrografía local. Como resultado, se propone un modelo estructural que integra la geología y tectónica de la cuenca, su relación con eventos deformacionales, la dinámica tectónica actual y su impacto en la evolución del relieve. Este modelo presenta una alta concordancia con el modelo de dominó, ya que las fallas secundarias identificadas en campo se disponen de manera transversal a las fallas principales, indicando un control estructural acorde con la dinámica tectónica regional.

---

\* Trabajo de Grado

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

### Abstract

**Title:** Evidence of recent tectonic activity in the deposits of the Bucaramanga Formation\*

**Author(s):** Elber Esneider Figueroa Blanco\*\*

**Key Words:** Bucaramanga Formation, Alluvial Fan, Sediments, Stress Tensor.

**Description:** The analysis of the structural context of the metropolitan area of Bucaramanga, located in a geomorphological depression bounded by the Bucaramanga and Suárez faults, has been the subject of numerous geological studies aimed at understanding the evolution of its sedimentary basin. This research seeks to integrate and correlate the contributions of different authors through the collection and analysis of field data from various outcrops in the region. To achieve this, sketches of existing geological models were developed, evaluating their validity in the formation and evolution of the basin. With the support of satellite images, field visits were planned at 50 stations, allowing the identification of four faults in the northern and western areas of the study region: the Parque El Gallineral Fault, the Centro Abastos Fault, the Parque Industrial II Fault, the Picha stream Fault and the La Cemento Fault. These structures are directly related to the geodynamic evolution and recent tectonic activity of the region, as well as providing key information on changes in local hydrography. As a result, a structural model is proposed that integrates the geology and tectonics of the basin, its relationship with deformational events, the current tectonic dynamics, and its impact on landform evolution. This model shows a high correlation with the domino model, as the secondary faults identified in the field are arranged transversely to the main faults, indicating a structural control consistent with the regional tectonic dynamics.

---

\* Degree Work

\*\* Physicochemical Engineering Faculty. Geology school. Geology. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño. PhD. Geosciences.

## Introducción

El análisis del contexto estructural en los asentamientos humanos es de vital importancia ya que de esta manera se puede evitar el riesgo de la población por la construcción de viviendas en zonas inestables debido a la actividad tectónica reciente, es por eso que el área metropolitana de Bucaramanga es un área de interés debido a que está construida sobre una depresión geomorfológica delimitada por la Falla de Bucaramanga al Este y la Falla del Suarez al Oeste. Este contexto tectónico plantea un interrogante respecto a la acumulación y evolución de los depósitos que componen lo que se conoce según diversos autores como la Mesa, Terraza, Meseta o Abanico de Bucaramanga, en este caso se toma el termino Abanico ya que es más acorde a las características geomorfológicas presentes. El ápice del Abanico se sitúa en lo que hoy es el barrio Morrórico y se extiende hacia el occidente con una extensión de 60 a 80 km<sup>2</sup>. Con el fin de entender y tener claridad sobre los aspectos geológicos del área, algunos autores han realizado estudios tectónicos, geomorfológicos y estratigráficos en esta zona (Julivert, 1958; De Porta, 1959; Navas, 1962; Niño & Vargas, 1992; Clavijo & Vargas, 2017; Velandia, 2017), entre otros. Sin embargo, aún no se tiene consenso en cuanto a la historia geológica y la evolución estructural asociada. Es por eso que teniendo en cuenta trabajos de investigación como los realizados por Galán & Mora (2019) y García & Quintero (2019), se pretenden analizar los distintos modelos planteados previamente para el Abanico de Bucaramanga visitando distintos afloramientos, buscando y tomando datos de neotectónica, para así poder corroborar lo planteado por dichos autores y posteriormente plantear un modelo estructural para el área, tal que permita entender la evolución de la depresión tectónica de Bucaramanga entre el Holoceno y el presente, con base en evidencia de actividad neotectónica en miembros de la Formación Bucaramanga.

### **Justificación**

La ciudad de Bucaramanga ubicada en la región nororiental de Colombia está situada en una depresión tectónica que corresponde a una esquina en la cual convergen dos fallas geológicas consideradas activas, la Falla de Bucaramanga y la Falla del Suarez. La Falla Bucaramanga tiene una tasa de desplazamiento de 2,5 mm/a según Diederix et al. (2020) y por el noroeste la Falla del Suarez un desplazamiento de 0,1 mm/a (Page, 1986). Esta actividad reciente requiere mayor soporte en datos de la zona que permitan la comprensión de los procesos geológicos involucrados.

La relación entre estas dos estructuras es aún compleja de entender a la luz de los trabajos publicados, la dificultad radica especialmente en que no se cuentan con suficientes evidencias y datos en los depósitos de la Formación Bucaramanga. Para abordar esta laguna de conocimiento, es esencial llevar a cabo trabajos detallados de tensores de esfuerzos en esta unidad geológica que permitirán definir con mayor precisión los mecanismos de generación y evolución de la cuenca sedimentaria reciente, esta información es fundamental no solo para mejorar nuestra comprensión científica de la región, sino también para validar o refutar los modelos tectónicos existentes, tales como una cuenca de tracción descrita por Julivert (1958), una sintaxis negativa enunciada por Rossello et al. (2011), y un modelo de dominó transcurrente sugerido por Velandia (2017) y Velandia et al. (2020).

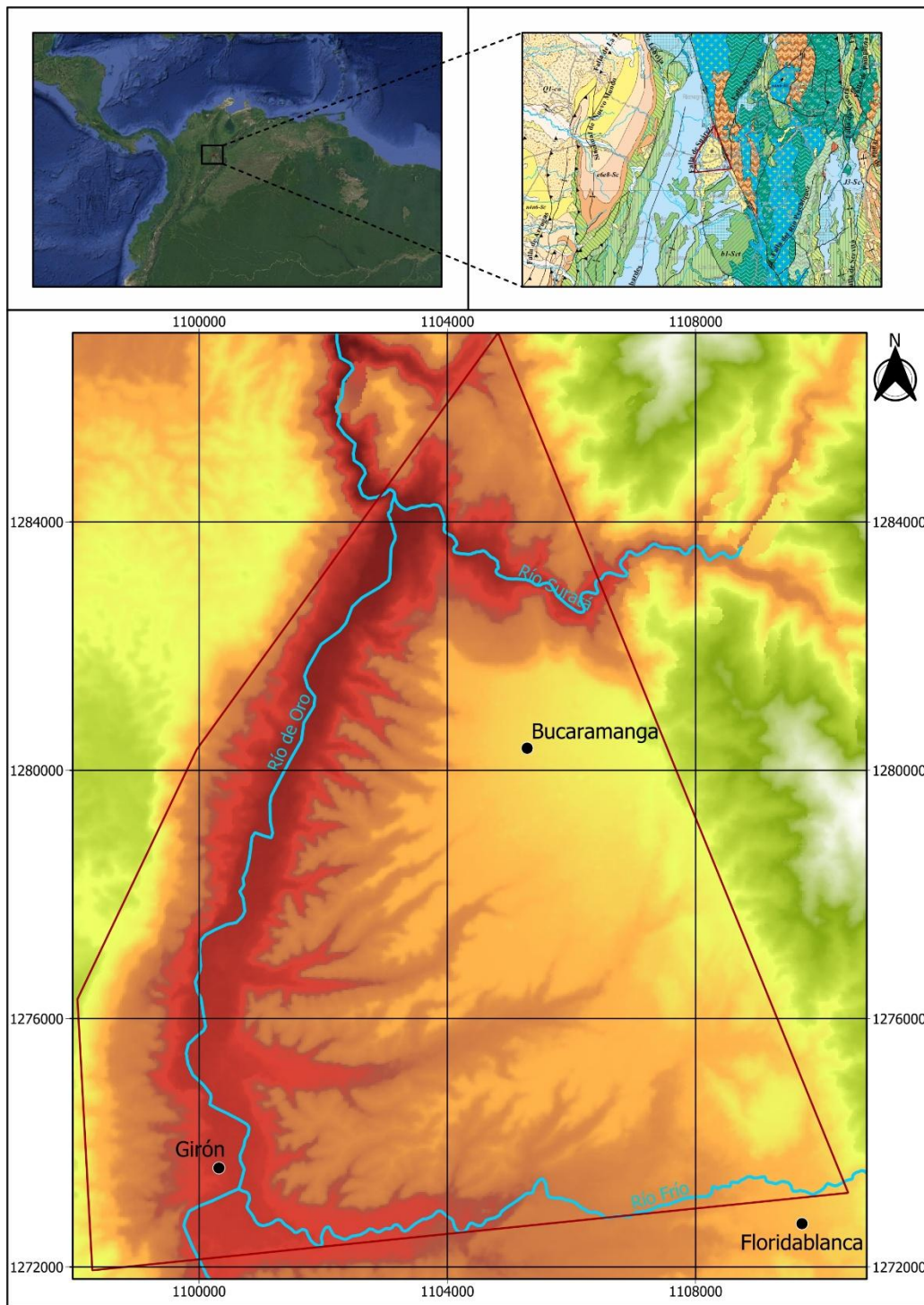
La comprensión más profunda y precisa de estos procesos geológicos no solo tienen implicaciones académicas, sino también prácticas, especialmente en términos de evaluación de la amenaza sísmica y planificación urbana.

### 1. Localización zona de estudio

La zona de estudio abarca los depósitos la Formación Bucaramanga, que ocupan parte de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón en el departamento de Santander, Colombia (Figura 1). Como rasgo morfológico se trata de un gran cuerpo de sedimentos con erosión diferencial que tiene características de un abanico aluvial desembocando del frente montañoso controlado por la Falla de Bucaramanga. Desde su ápice cerca del lomo de Morrórico, hasta su terminación contra el Escarpe de Palonegro/Cantalta, el abanico cubre una distancia longitudinal entre 5 y 14 km debido a la orientación oblicua del escarpe de Palonegro/Cantalta con respecto a la orientación de la Falla Bucaramanga. El ancho del abanico cubre una distancia de 26 km en dirección transversal (Diederix et al., 2008). Hacia el Sur el abanico termina contra el escarpe de la Mesa de Ruitoque en un contacto discordante normal, la margen lateral norte del Abanico es delimitada por la cuenca del río Suratá

#### **Figura 1**

*Localización zona de estudio*



*Nota.* Esta imagen muestra la zona de estudio del presente trabajo cubriendo el Abanico de Bucaramanga y zonas aledañas que ayudan con el contraste geomorfológico. Además, se muestra la ubicación geográfica del área de estudio con coordenadas MAGNA-SIRGAS, origen Bogotá.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Plantear un modelo estructural y neotectónico de la cuenca de Bucaramanga a partir del análisis de indicadores cinemáticos en los depósitos cuaternarios.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Diferenciar los distintos contextos estructurales de la cuenca de Bucaramanga mediante la compilación de la información existente.

Identificar y describir diversos indicios y evidencias de la actividad neotectónica en afloramientos de los alrededores del área metropolitana de Bucaramanga.

Construir un modelo estructural y estratigráfico 3D del área de estudio a partir de la correlación de afloramientos.

Realizar una discusión sobre el origen y evolución de la cuenca de la Formación Bucaramanga frente a los modelos estructurales conocidos.

## **3. Marco geológico**

### **3.1 Estratigrafía**

La Formación Bucaramanga fue descrita inicialmente por De Porta (1959) como un importante depósito sedimentario de edad Cuaternaria, que corresponde morfológicamente a un abanico aluvial erosionado. Se asocia principalmente al río Suratá, fue acumulado sobre una depresión originada por actividad tectónica, sobre el cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga.

Según INGEOMINAS (2001) el espesor del depósito aumenta de oriente a occidente, pero no se tienen datos claros del valor real, algunos estudios muestran promedios cercanos a los 250 m en los sectores más profundos, además afirman que, con base en la granulometría, morfología, agentes de transporte y fuentes de los materiales, esta unidad se acumuló en un ambiente típicamente fluvial, donde alternan materiales de origen aluvial tipo cono de deyección, flujos de escombros, canal y lagunar. Trabajos realizados por (Hubach, 1952; Niño & Vargas, 1992), proponen cinco miembros para la Formación Bucaramanga definidos de base a techo como: Calcáreo o Pre-Órganos, Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos. En la Tabla 1, se muestra la recopilación del estado del arte de la estratigrafía de la Formación Bucaramanga.

**Tabla 1**

*Recopilación del estado del arte. Estratigrafía de la Formación Bucaramanga*

DIVISIÓN DE LA FORMACION BUCARAMANGA											
AUROSORES	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	Nivel superior	Nivel superior (Cantos)	Segmento Gravoso	Miembro Gravoso					
		Capa arcillosa	Nivel medio	Nivel medio (arcilla, arenas finas)	Segmento Finos	Miembro Finos					
		Capa alternada									
	Formación Órganos		Nivel inferior	Nivel inferior (Cantos)	Segmento Órganos	Miembro Órganos		Órganos superior	Miembro Órganos	Órganos superior	Miembro Órganos
					Segmento Calcáreo			Órganos inferior		Órganos inferior	
							Miembro Pre-Órganos				

*Nota.* Esta tabla muestra los estudios estratigráficos realizados en la Formación Bucaramanga, hacia la parte inferior de la tabla la base de la Formación. Tomado y editado de Gutiérrez & Pico (2020).

En INGEOMINAS (2010) mencionan que de acuerdo con las dataciones paleomagnéticas publicadas en el proyecto hidroeléctrico Fonce-Suárez, la parte más antigua de la Formación Bucaramanga tiene unos 730.000 años ubicándola dentro del Pleistoceno medio-superior, sin embargo, en la investigación paleo-magnética realizada por Jiménez et al. (2015) obtuvieron como resultado que el Abanico de Bucaramanga debería ser más antiguo que la transición Brunhes-Matuyama (0.8 Ma), adicionalmente en un estudio realizado por Struth et al. (2020) donde analizan la reorganización de los drenajes en la Cordillera Oriental, los cuales según el modelo pasan de ser dominios longitudinales a transversales donde la red del río Magdalena capturó la cuenca del río Suarez hace aproximadamente unos 405 mil años, esta información permite inferir que esa es la edad del tope del miembro más potente de la Formación Bucaramanga (el miembro Órganos).

### ***3.1.1 Miembro Pre-Órganos***

Definido inicialmente por Niño & Vargas (1992) como segmento calcáreo, constituye la base de la Formación Bucaramanga. Este segmento aflora solo en su parte media al norte de la escarpa occidental, en el área no es posible observar ni su base ni su tope. Algunos estudios recientes han señalado la presencia de paleosuelos y bancos carbonatados, características que lo diferencian del Miembro Órganos (Arévalo & Rincón, 2016). Este miembro presenta una litología compuesta por lodos, lodos arenosos compactos gravas arenosas y gravas arenolodosas en capas con geometría tabular, dentro de la composición del sedimento presenta fragmentos calcáreos, algunos feldespatos alterados con clastos ígneos y metamórficos.

### **3.1.2 Miembro Órganos**

Definido por Hubach (1952). Aflora en las laderas y escarpes de la parte occidental del Abanico de Bucaramanga, el Área Metropolitana y en los cortes de la carretera que comunica la población de Girón con la ciudad de Bucaramanga. Con un espesor que podría superar los 180 m, es el nivel más potente de la Formación Bucaramanga. Se erosiona fácilmente formando surcos, cárcavas y tierras malas que dan formas de estoraques desarrollando un drenaje dendrítico subparalelo. Se presentan niveles lenticulares limo arenosos, con espesores hasta de 5 m, niveles de aspecto conglomerático que conforman depósitos de gravas y bloques, débilmente consolidados, clasto-soportados y grano-soportados, dispuestos en forma de capas gruesas, con espesores hasta de 15 m. Su origen se relaciona con depósitos cíclicos intercanales. El predominio de lentes hacia la parte superior y los contactos irregulares podrían indicar periodos de erosión por corrientes intermitentes descrito por Bueno & Solarte (1994). El ambiente de depósito de este miembro se relaciona con flujos de escombros y flujos torrenciales, correspondiendo a la parte proximal y media del Abanico de Bucaramanga. En INGEOMINAS (2001) afirman que, la edad del Miembro Órganos podría abarcar el Pleistoceno medio.

### **3.1.3 Miembro Finos**

Este nivel fue reconocido y definido por Hubach (1952). Es una extensa capa lenticular horizontal, más o menos continua, de unos 15 m de espesor promedio, donde alternan niveles arcillosos, limo-arenosos y areno-limosos, de colores gris verdoso. Según INGEOMINAS (2001) La secuencia del miembro Finos se puede dividir en dos conjuntos: (I) Conjunto Arcilloso, localizado hacia la base, caracterizado por ser arcillo-limoso, masivo, de colores grises a verdes, con estratificación plana paralela, en donde el espesor varía ampliamente; (II) Conjunto Arenoso, localizado hacia el techo, donde muestra una alternancia de niveles areno-limosos con niveles

limo-arenosos arcósicos de colores amarillento a pardo amarillento; hacia la base de este conjunto predominan costras y un nivel arcilloso pardo oscuro. El Miembro Finos es, en gran parte del área, un nivel guía de baja permeabilidad. El ambiente de deposición 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.

#### ***3.1.4 Miembro Gravoso***

Definido por Niño & Vargas (1992), ubicado principalmente sobre la escarpa occidental y norte de Bucaramanga. La morfología que presenta el miembro Gravoso es similar a la del miembro Órganos en los sectores de los valles de las quebradas, pero hacia la parte sur de la morfología corresponde a colinas suaves onduladas, con un drenaje dendrítico. Su espesor varía entre 8 y 30 m. Presenta niveles gravosos, gravo arenosos y gravo lodosos, con cantos compuestos en su mayor parte por rocas metamórficas-ígneas del Macizo de Santander, areniscas cuarzosas, areniscas limosas y limolitas moradas de las formaciones Girón y Jordán. La matriz, por su parte, es de composición cuarzo-feldespática micácea, de consistencia media y de baja cohesión. Existen unos depósitos bastante meteorizados que cubren el cerro La Cumbre, probablemente pertenecientes al Miembro Gravoso, los cuales pudieron ser levantados por acción tectónica. Los depósitos que conforman el miembro Gravoso presentan un grado de meteorización medio a alto. Los bajos porcentajes de humedad natural, el predominio granular y el grado de meteorización sugiere que, al menos la parte superficial de este miembro tiene poca compactación y buena permeabilidad. El ambiente de deposición indica un dominio de flujo de escombros.

#### ***3.1.5 Miembro Limos Rojos***

Nivel definido por Julivert (1963). Este miembro se localiza en el sector urbanizado de Bucaramanga, aunque no en forma uniforme, se continúa hacia el sur hasta el sector norte del

municipio de Floridablanca. Geomorfológicamente este miembro constituye lo que anteriormente se denominaba como “Meseta de Bucaramanga”, con relieve semiplano y pendientes entre 2 y 7%; el drenaje es escaso paralelo y superficial (Niño & Vargas, 1992). Está constituido por arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Suprayace al segmento gravoso y su contacto con éste es gradacional. La parte más superficial de este miembro se encuentra altamente meteorizada, formándose en algunos sectores niveles de oxidación que le ayudan a incrementar su compactación y resistencia a la erosión. El ambiente de deposición indica un dominio de flujo de lodos combinados con caídas de bloques de la pendiente del macizo.

### **3.2 Geología estructural**

La tectónica local del Abanico de Bucaramanga se encuentra en un marco estructural complejo, definido de manera general por dos fallas principales, al oriente de la ciudad se tiene la Falla Bucaramanga, la cual yuxtapone la Formación Bucaramanga con el Macizo de Santander y hacia el occidente la Falla del Suárez cuyo rasgo más visible en la zona es el Escarpe de Palonegro-Cantalta labrado en rocas de las formaciones Girón, Los Santos y Rosa Blanca (Diederix et al., 2008). Estas dos fallas convergen al norte de la ciudad de Bucaramanga. Teniendo en cuenta el análisis de tensores y geología regional de Velandia (2017), la Falla de Bucaramanga presenta una cinemática de transcurrencia sinistral con componente vertical inverso describiendo una estructura en flor positiva.

Carrillo & Vergara (2002) proponen que los mejores y más variados rasgos de neotectónica en la zona, están asociados a la Falla de Bucaramanga junto con sus fallas satélites, los cuales están presentes principalmente entre Curos (Santander) y San Alberto (Cesar). También encontraron indicios de neotectónica en el área metropolitana, donde se observan varios afloramientos en los cuales los depósitos del Abanico de Bucaramanga se presentan cabalgados por rocas más antiguas,

evidencia de actividad tectónica Cuaternaria de la Falla de Bucaramanga. La Falla de Suárez y sus satélites subparalelas de corta longitud, entre las que se menciona la Falla de Río de Oro, también presentan rasgos de neotectónica, como 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 según mencionan Carrillo & Vergara (2002).

### ***3.2.1 Falla de Bucaramanga***

Se trata de un sistema de falla transcurrente lateral izquierdo con una componente vertical significativa que ha provocado el levantamiento del Macizo de Santander. Varios autores han estimado un movimiento horizontal acumulativo de 30 a 224 kilómetros, pero estos estimativos no están respaldados por documentación sólida y carecen de un marco temporal (Boinet et al., 1989, Ujueta, 2003, París & Romero, 1994; Ingeominas, 1997; París et al., 2000; Diederix et al., 2008; 2009; Osorio et al., 2008).

Entre el sur de Bucaramanga y Ricaurte la falla presenta una longitud de 82 km, 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° y 140° (Velandia, 2017). Entre las evidencias de actividad neotectónica se encuentran afloramientos dentro del área metropolitana de Bucaramanga en donde unidades Jurásicas cabalgan sobre los depósitos del abanico, así como tasas de deslizamiento actuales ( $\leq 3$  mm/año) que se han propuesto para la falla de Bucaramanga según Jiménez et al. (2015).

### ***3.2.2 Falla del Suárez***

Según París et al. (2000) la Falla Suárez es una falla inversa con componente sinistral con dirección promedio N21°E e inclinación 60°-90° W; la cual ha sido trazada con una longitud de aproximadamente 120 km desde Puente Nacional, Santander hasta el norte de la ciudad de Bucaramanga, donde converge con la Falla de Bucaramanga. Diederix et al. (2008) también afirman que es una falla activa con actividad cuaternaria y basados en el desplazamiento de depósitos cuaternarios propuestos en Page (1986) definen una tasa de desplazamiento promedio es de 0,1 mm/año.

De acuerdo con Julivert (1963) esta estructura tuvo actividad simultánea o incluso posterior al depósito de la Formación Bucaramanga ya que cerca del contacto fallado, los depósitos del abanico muestran discordancias progresivas que atestiguan el sintectonismo del depósito con el movimiento de la falla. Un ejemplo se encuentra en un afloramiento en la carretera que lleva al Aeropuerto en la salida de Girón, donde los estratos del abanico están en discordancia progresiva hasta verticales en contacto con la falla y están tapados por un enorme espesor de escombros originado de la Formación Girón, levantada por la falla.

### ***3.2.3 Falla del Río de Oro***

En Diederix et al. (2008) definen la Falla del Río de Oro como una falla satelital o “splay” que se origina a poca profundidad de la Falla Suárez y tiene carácter de falla de cabalgamiento debido a que se asumen que superpone la Formación Girón sobre depósitos del abanico. Su configuración cartográfica muestra salientes y bahías emergiendo y regresando a la traza de la Falla Suárez. Según indica Diederix et al. (2008), la Formación Girón cabalga con un ángulo de alrededor de 30° a los depósitos del abanico. Entre las expresiones morfológicas de esta falla está el hecho de que controla el cauce del río de Oro.

## **4. Metodología**

La presente investigación adopta un enfoque exploratorio con énfasis tectónico, centrado en el análisis de los procesos y estructuras relacionados con el movimiento de la corteza terrestre, tales como fallas, pliegues, fracturas y zonas de deformación. El estudio se enfoca en la Formación Bucaramanga, combinando la revisión de aportes realizados por diversos autores con la correlación de datos obtenidos en campo, a partir del levantamiento estructural en distintos afloramientos ubicados en el Área metropolitana de Bucaramanga.

### **4.1 Fase I: Recopilación bibliográfica**

Partiendo de investigaciones previas respecto a la evolución de la depresión tectónica donde se depositó la Formación Bucaramanga, se tuvieron en cuenta los estudios realizados por distintos autores a lo largo del tiempo. Entre ellos se encuentran los trabajos de Julivert (1958), quien realizó una investigación pionera sobre la estructura tectónica de la región; De Porta (1959), que complementó estos estudios con observaciones detalladas principalmente a nivel estratigráfico; y Navas (1962), quien contribuyó con importantes hallazgos sobre la sedimentología de la Formación Bucaramanga. Posteriormente, investigaciones como las de Niño y Vargas (1992) aportaron nuevos datos sobre la tectónica activa y la evolución geológica de la depresión, también Clavijo y Vargas (2017) quienes introdujeron métodos de análisis estructural y geofísico para profundizar en el conocimiento de la dinámica tectónica. Velandia (2017) continuó esta línea de investigación, usando nuevos métodos de modelación tectónica y análisis de esfuerzos para proponer nuevos modelos sobre la formación y evolución de la cuenca sedimentaria.

A partir de este conocimiento, se procedió a identificar afloramientos para la recolección de datos. Este proceso se llevó a cabo con un enfoque sistemático, teniendo en cuenta los sitios mencionados en la literatura como, en el estudio de Galán & Mora (2019), y se complementaron con el uso de herramientas modernas de georreferenciación y visualización, principalmente los programas Qgis y Google Earth Pro los cuales fueron fundamentales en esta etapa, facilitando la identificación precisa de los afloramientos y la planificación de las campañas de campo.

#### **4.2 Fase II: Trabajo de campo**

Esta fase metodológica integró técnicas de campo tradicionales, como la medición de datos estructurales con brújula geológica, la identificación contactos y estructuras, así como la localización de afloramientos a partir elementos geográficos aledaños y la infraestructura vial, además se realizó el registro de información en libreta de campo. Estas actividades se complementaron con herramientas modernas de precisión, como el uso de GPS para obtener la ubicación geográfica de los afloramientos y la implementación de aplicaciones móviles, como Clino, que permite tomar notas estructurales, medir buzamientos, registrar muestras y generar mapas directamente desde el dispositivo móvil, estableciendo una base para el análisis geológico subsiguiente. Teniendo la identificación y localización de los afloramientos en la zona, se procedió a realizar una descripción estratigráfica de dichos afloramientos y a la recolección de datos geológicos esenciales. Esta etapa incluyó varias actividades claves para asegurar la precisión de la información recopilada. Inicialmente el levantamiento estratigráfico, el cual consistió en describir y documentar la litología, la textura y estructuras de las sucesiones de rocas sedimentarias en los afloramientos. Luego se identificaron y tomaron datos de planos de fallas (teniendo en cuenta estrías de falla, superficies pulidas, estructuras tipo Riedel y estructuras en escalón), diaclasas, y demás estructuras indicadoras de actividad tectónica en cada afloramiento, además, se tomaron

distintas panorámicas con el fin de correlacionar los afloramientos y proporcionar una ayuda visual facilitando la posterior interpretación de los datos.

#### **4.3 Fase III: Trabajo de oficina**

Luego de obtener los datos de campo se inició el procesamiento de la información recolectada, primero se hizo la tabulación en hojas de cálculo en Excel lo que permitió generar archivos de texto sin formato (.txt). Estos archivos fueron cargados en los programas QGIS y ArcGIS permitiendo la visualización, análisis y manipulación de los datos geoespaciales, identificando la distribución de afloramientos y estructuras geológicas. Posteriormente se importaron los datos a las herramientas GeoRose, Stereonet y Win Tensor. Georose se usó para crear diagramas de rosas ilustrando la orientación y frecuencia de las estructuras geológicas, Stereonet permitió el análisis de planos de falla, diaclasas y otros elementos estructurales generando diagramas estereográficos para poder obtener patrones de deformación y esfuerzos. En Win Tensor se realizó el análisis de planos de falla, ingresando la actitud de los planos junto al rake medido para las estrías, este programa deduce el campo de esfuerzos que generó el patrón de fallas y estrías observadas.

A continuación, se generaron algunos cortes estructurales proporcionando una visualización interna de las capas de la Formación Bucaramanga y las fallas. Finalmente se utilizó el software CorelDRAW para editar y mejorar haciendo que los mapas y diagramas fueran más estéticos y fáciles de comprender y así comunicar los resultados de manera clara y efectiva.

#### **4.4 Fase IV: Elaboración del informe final**

En esta última fase del trabajo de investigación se realizó el informe final en el cual se da a conocer paso a paso el trabajo realizado, la recolección de datos de afloramiento, el análisis de datos y la validación, interpretación, y discusión de resultados.

De esta manera se pudo plantear un modelo estructural de la zona de estudio con base en los datos encontrados durante el desarrollo del proyecto y así posteriormente hacer una correlación con los modelos planteados previamente por otros autores.

## **5. Resultados**

### **5.1 Modelos geológicos del Abanico de Bucaramanga**

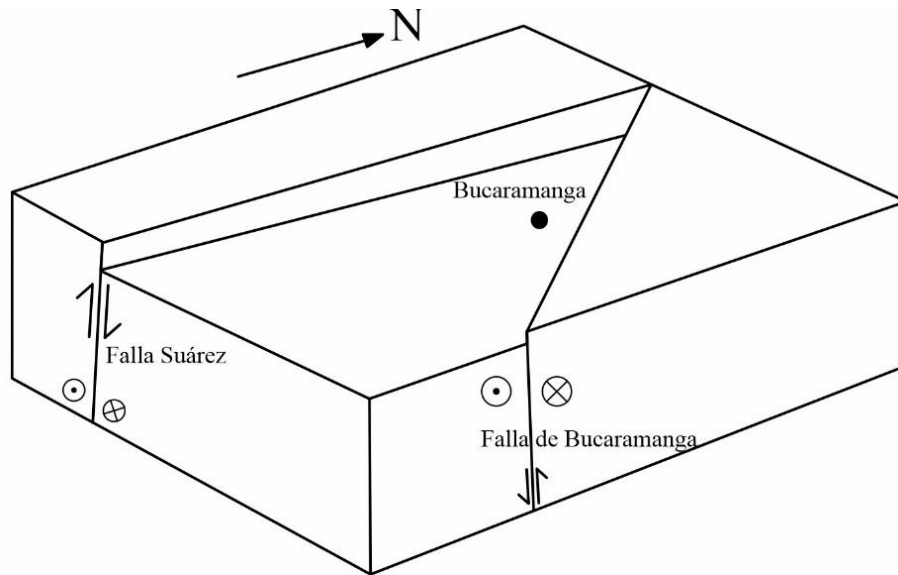
A partir de la revisión bibliográfica se pudo determinar que para la cuenca donde se depositó el abanico de Bucaramanga, diversos autores han planteado modelos tectónicos que intentan explicar la formación y evolución de la cuenca, entre ellos se describen los más destacados a continuación.

#### ***5.1.1 Modelo generado con base en Julivert (1958)***

El estudio realizado por Julivert (1958) llamado, “La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga”, este autor propone que la región de los Andes del Norte, principalmente la cordillera Oriental colombiana esta segmentada en bloques tectónicos, lo que causó movimientos independientes debido a la actividad tectónica. Partiendo de lo anterior plantea la formación de la cuenca donde se depositó la Formación Bucaramanga como una pequeña dovela en hundimiento ubicada entre las fallas que rompen los bloques en elevación (Figura 2). Esta dovela abarca el área de Bucaramanga-Girón-Chocóa-Piedecuesta. Partiendo de la idea propuesta por Julivert (1958) se sugiere el siguiente bloque diagrama como ejemplo del modelo planteado por este autor.

#### **Figura 2**

*Modelo elaborado según lo descrito por Julivert (1958)*



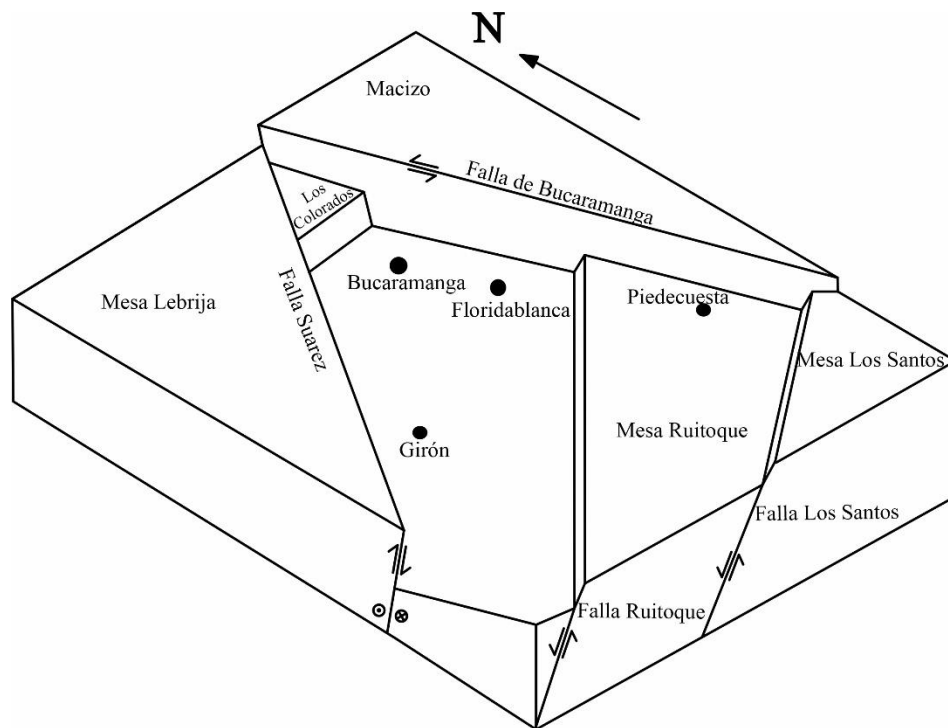
*Nota.* Bloque diagrama que ilustra la acción de las fallas Bucaramanga y Suarez generando la dovela de hundimiento donde se encuentra la ciudad de Bucaramanga.

### **5.1.2 Modelo planteado por Niño & Vargas (1992)**

En la investigación realizada por Niño y Vargas (1992) titulada “Geología y geotecnia de la escarpa noroccidental de la meseta de Bucaramanga” sugieren que además de la actividad tectónica generada en la Falla de Bucaramanga y la Falla del Suarez se tiene la presencia de dos fallas transversales, denominadas la Falla los Santos y la Falla Ruitoque, estas fallas según proponen tienen cinemática normal, es así como plantean que la cuenca era inicialmente de carácter extensional permitiendo la formación de la cuenca dando lugar al depósito del abanico de Bucaramanga de manera sintectónica, y posteriormente experimentó un régimen de compresión (Figura 3). También mencionan que el depósito de los sedimentos de la Formación Bucaramanga generó subsidencia, de tal manera tanto la actividad de las fallas como la subsidencia iban generando el espacio para el depósito de más sedimentos en el abanico.

### **Figura 3**

*Modelo planteado por Niño & Vargas (1992)*



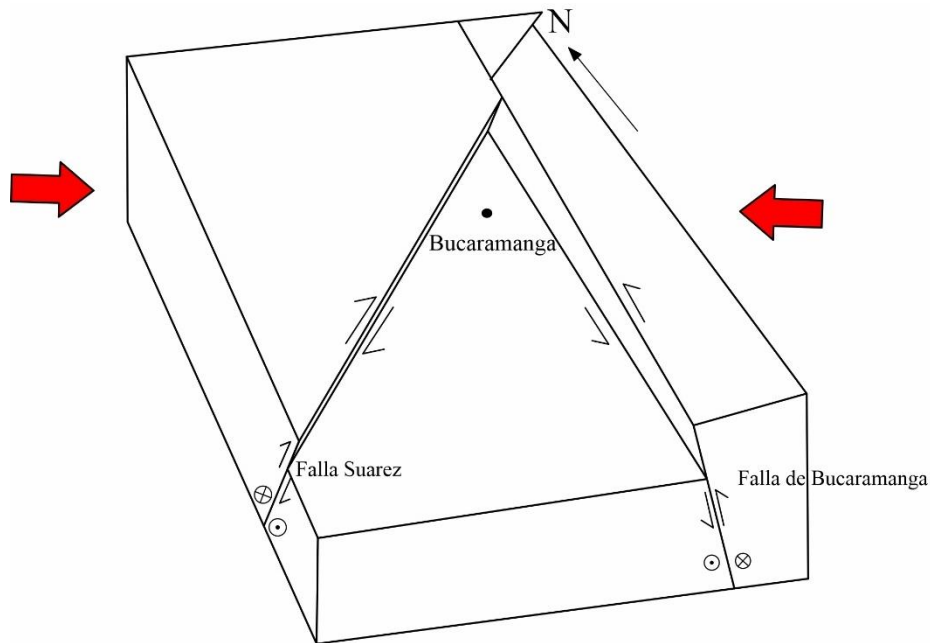
*Nota.* Este bloque diagrama se evidencia la acción de las fallas normales que causan el hundimiento de la cuenca, tomado y editado de Niño & Vargas (1992)

### 5.1.3 Modelo generado con base en Rossello et al. (2011)

Según el artículo de Rossello et al. (2011) titulado “Análisis morfoestructural comparativo de los megafallamientos neógenos Valle Fértil (Argentina) y Santa Marta – Bucaramanga (Colombia)” se genera el modelo mostrado en la Figura 4. En este caso los autores sugieren que la depresión tectónica se formó a causa de la convergencia oblicua entre las placas tectónicas de Nazca, Sudamericana y del Caribe generando dos sistemas de fallas mayores como lo son la Falla de Bucaramanga y la Falla del Suarez. Este modelo sugiere la generación de zonas de compresión y extensión.

### Figura 4

*Modelo elaborado según lo descrito por Rossello et al. (2011)*



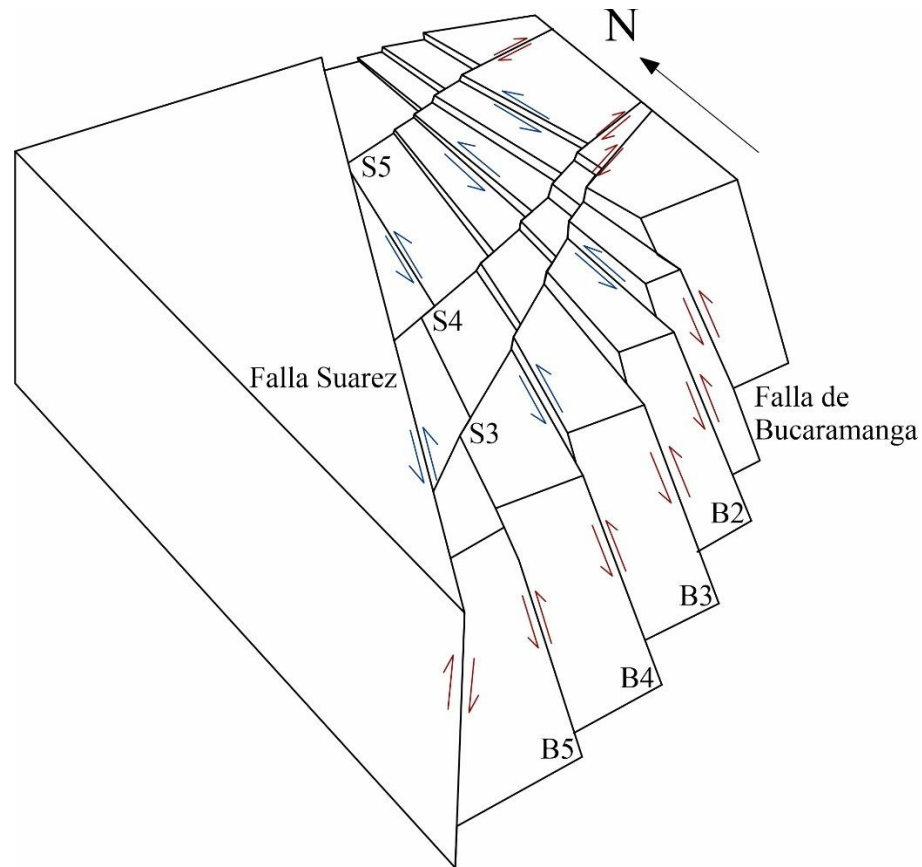
*Nota.* Este bloque diagrama evidencia el esquema geológico del efecto la sintaxis para la zona de la cuenca donde se depositó la formación Bucaramanga. Las flechas rojas indican el tensor resultante de la convergencia de las placas Nazca y Sudamericana, y la convergencia entre las placas Caribe y Sudamericana. Basado en Rossello et al. (2011)

#### **5.1.4 Modelo generado con base en Clavijo & Vargas (2017)**

En Clavijo & Vargas (2017) difieren del hecho que la falla de Bucaramanga sea un solo trazo, de tal modo que plantean el sistema de fallas de Bucaramanga, es decir varias fallas subparalelas con cinemáticas similares, también proponen fallas transversales con cinemática dextral cortando el sistema de fallas de Bucaramanga, esta configuración va dando una forma escalonada a la cuenca causando así que la parte más distal del abanico de Bucaramanga presente un espesor superior al espesor medido en el ápice del abanico, siendo este hecho contrario al presente en un contexto tectónico inactivo (Figura 5). Es así como teniendo en cuenta lo que mencionan Clavijo & Vargas (2017) se plantea el siguiente bloque diagrama para la formación de la cuenca.

**Figura 5**

*Modelo elaborado según lo descrito por Clavijo & Vargas (2017)*



*Nota.* En este bloque diagrama se plantea una serie de fallas que generan una zona con distintos niveles, también se propone que las fallas comparten cinemáticas similares. Modelo planteado según lo descrito por Clavijo & Vargas (2017).

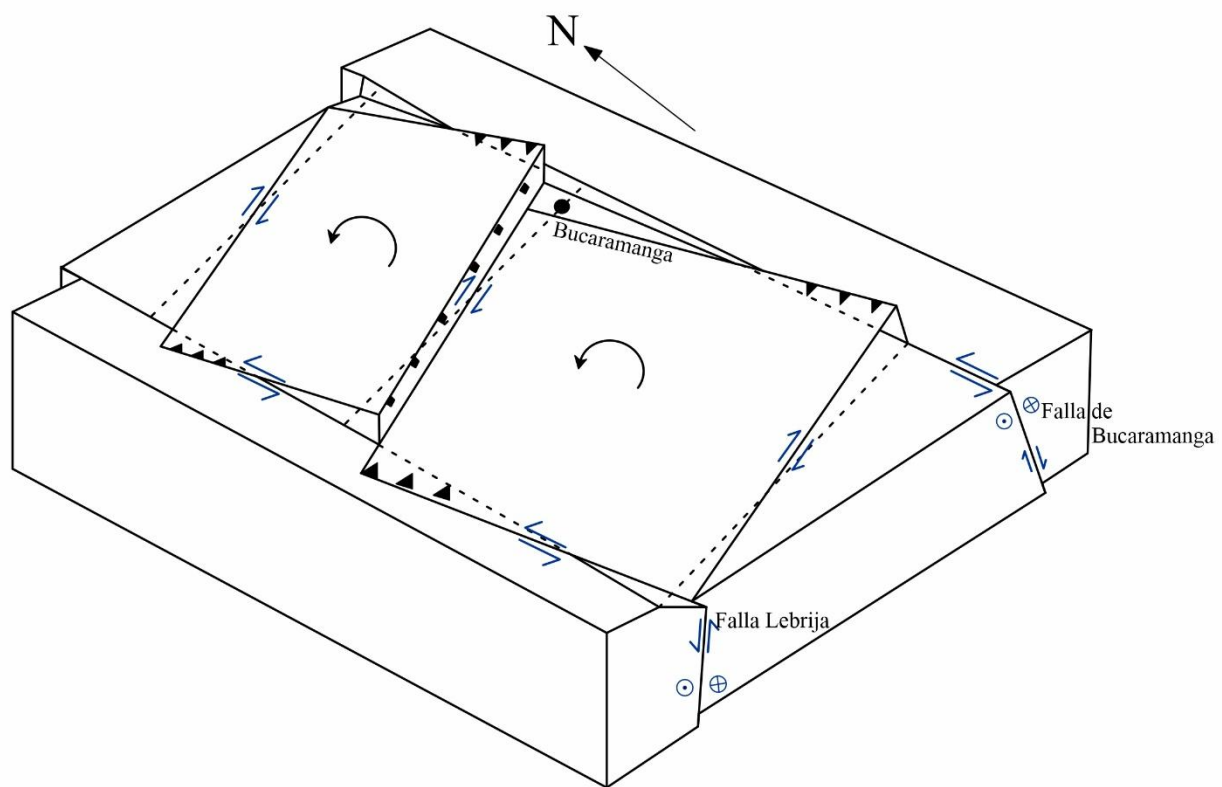
#### **5.1.5 Modelo generado con base en Velandia (2017)**

En la investigación realizada por Velandia (2017) llamada “Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga” establece la existencia de una estructura en flor positiva simétrica que incluye la Falla Guamalito, la Falla Bucaramanga y la Falla Lebrija, esta estructura es producto de

un sistema transpresivo sinistral determinado a partir del análisis de los tensores de esfuerzos, localmente entre las fallas mencionadas previamente se generan estructuras en dominó definidas por fallas con cinemática dextral confinadas entre las fallas mayores (Figura 6). Este tipo de estructuras en domino puede facilitar la generación de estructuras de fallas en tijera sin embargo no se tienen evidencia de esta situación para este caso por lo cual se considera un movimiento más homogéneo.

### Figura 6

*Modelo elaborado según lo descrito por Velandia (2017)*



*Nota.* En este bloque diagrama se plantea un modelo estilo domino según lo describe Velandia (2017)

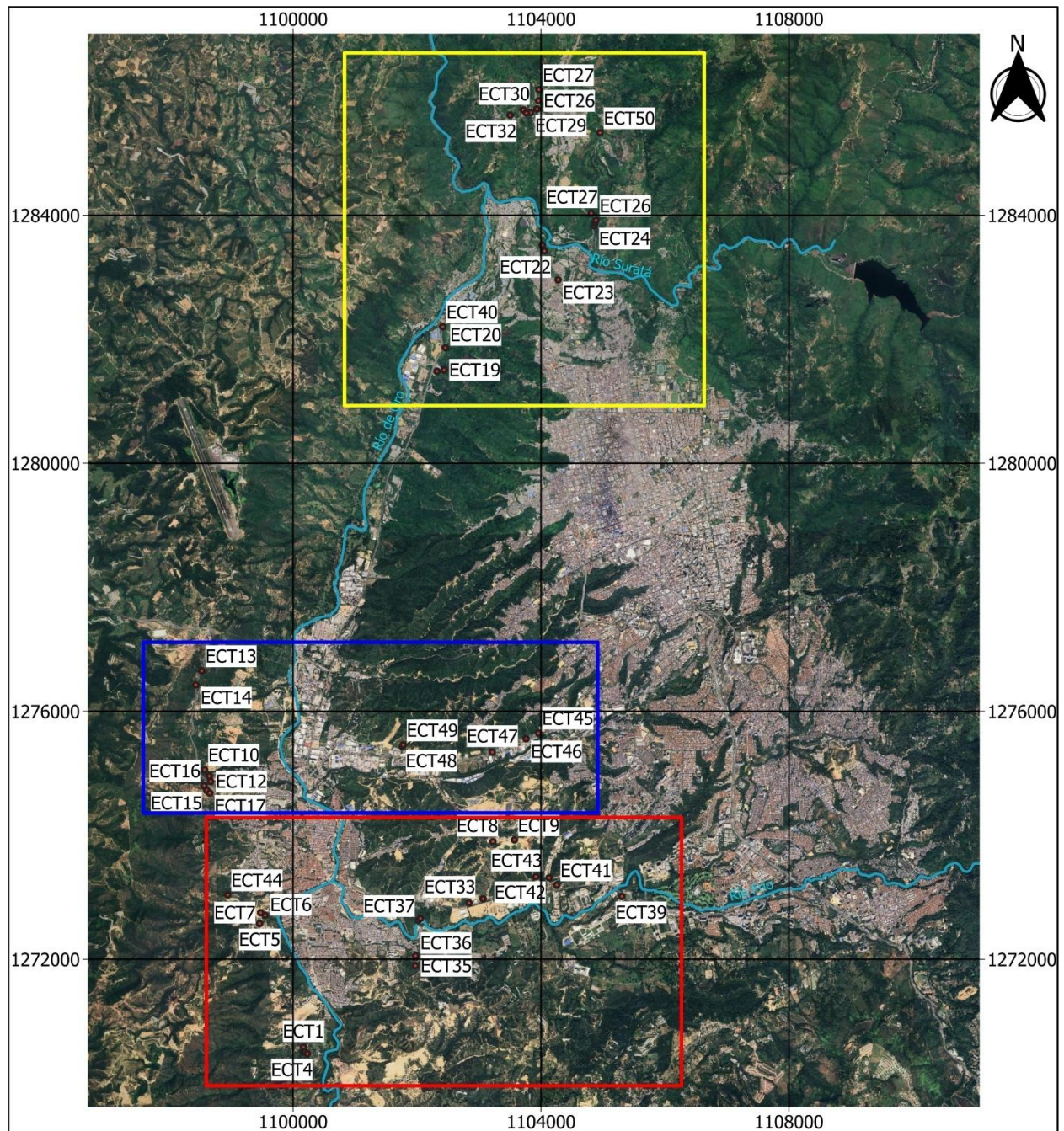
## 5.2 Afloramientos visitados en la zona de estudio

Mediante la revisión del mapa geológico realizado por, Ingeominas (2001) para el área metropolitana de Bucaramanga, modelos de elevación DEM, identificación de afloramientos reportados en estudios como el de Galán & Mora (2019) y el uso de la herramienta Google Earth Pro se pudieron detectar puntos estratégicos de interés geológico para realizar las visitas de campo, facilitando la localización de lugares clave para la toma de panorámicas y recolección de datos estructurales. A partir de esta identificación se llevaron a cabo recorridos a lo largo de la vía el Anillo Vial, la vía que conecta Bucaramanga, Girón y el aeropuerto Palonegro, así como en áreas del sector suroeste a las afueras de Girón. También se destaca la vía que conduce de Girón hacia el barrio Los colorados, Barrio Café Madrid, entre otros.

Durante la fase de campo se establecieron un total de 50 estaciones para la recolección de información geológica, abarcando tanto datos estructurales como observaciones de afloramientos. Se obtuvieron 166 datos estructurales (Apéndice A), los cuales incluyen mediciones de fallas, diaclasas, estrías de falla, etc. Además, se tomaron panorámicas de afloramientos para enriquecer el análisis posterior de las estructuras geológicas. En la Figura 7, se puede observar la distribución geográfica de todas las estaciones de campo realizadas.

### **Figura 7**

*Mapa de estaciones de campo realizadas en la zona de estudio*



*Nota.* Esta imagen muestra la ubicación de las estaciones realizadas durante el trabajo de campo. En el SE no se encontraron afloramientos de interés durante los recorridos de campo. Los recuadros representan la subdivisión del área de estudio de la cual se hablará más adelante. En amarillo zona norte, en azul zona centro y en rojo zona sur.

### **5.3 Evidencias de actividad tectónica**

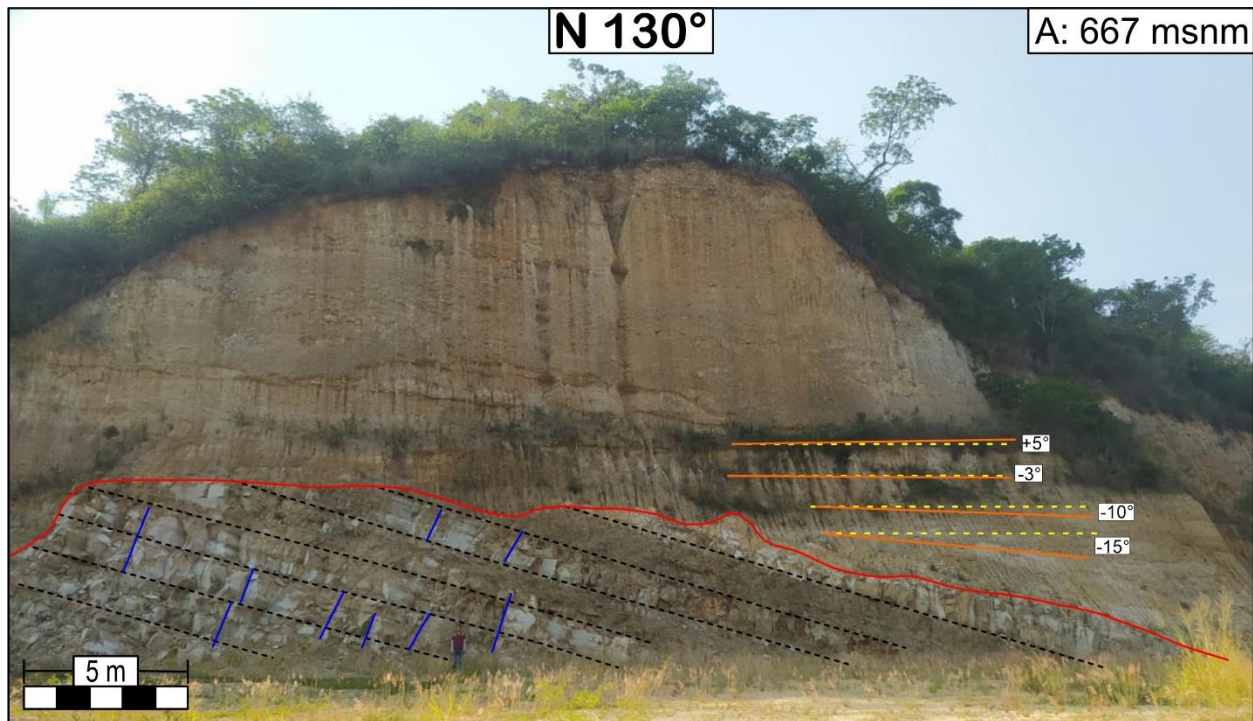
A continuación, se presentan las imágenes que documenta las evidencias de actividad tectónica reciente encontradas durante el trabajo de campo. Estas imágenes se organizan por la subdivisión en zonas del área de estudio, zona norte, zona centro y zona sur.

#### ***5.3.1 Evidencias en la zona norte***

Durante el trabajo de campo se identificó evidencia de la actividad tectónica contemporánea al depósito de la Formación Bucaramanga. En la Figura 8 se presenta un afloramiento ubicado junto a la vía Girón – Rionegro, a la altura del Parque Industrial II. En este sitio se determinó que el buzamiento de los depósitos la Formación Bucaramanga es de  $15^\circ$  en la parte basal. Sin embargo, conforme se avanza el depósito, los datos muestran una disminución progresiva en la magnitud del buzamiento, llegando a estar casi horizontales. Además, la roca que subyacente a los depósitos de la Formación Bucaramanga presenta un alto grado de diaclasamiento, lo que constituye una posible evidencia de la tectónica presente en la zona.

#### **Figura 8**

*Evidencia de tectónica durante el depósito de la Formación Bucaramanga.*

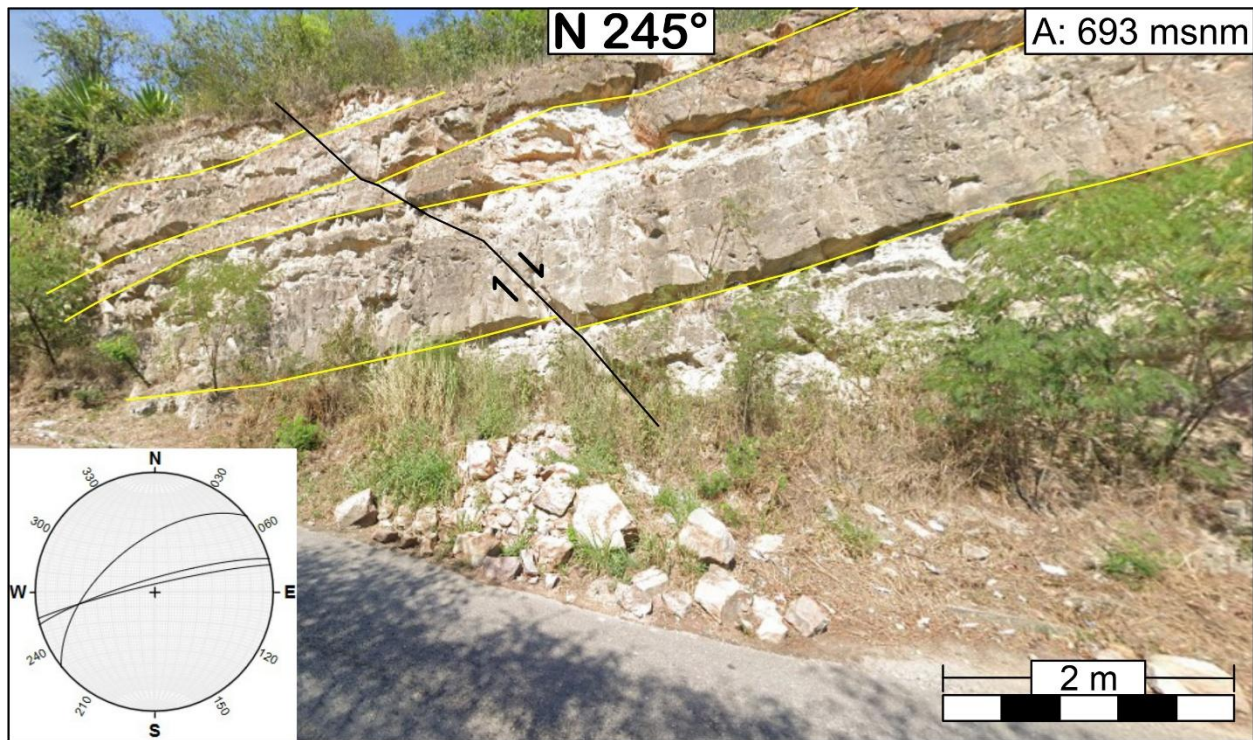


*Nota.* En la imagen se muestra un cambio progresivo en el buzamiento a medida que se depositó la Formación Bucaramanga. Estación ECT18 (rojo contacto discordante, azul diaclasas, naranja estratigrafía, amarillo líneas guía horizontales).

En la Figura 9, se observa un afloramiento ubicado al costado de la vía en el barrio Café Madrid, donde se encuentran expuestas capas pertenecientes a la Formación Girón, estas capas muestran signos de deformación tectónica, siendo posible observar una falla normal que corta y desplaza los estratos además de algunas familias de diaclasas. A pocos metros al norte de este afloramiento se identificaron depósitos sedimentarios correspondientes al Miembro Órganos

### **Figura 9**

*Evidencia de tectónica al costado de la vía Barrio Café Madrid*



*Nota.* Afloramiento de la Formación Girón al costado de la vía en el barrio Café Madrid, se observa diaclasamiento y una falla normal. Estación ECT21.

El afloramiento mostrado en la Figura 10, ubicado al borde de la vía que conduce de Girón al barrio Los Colorados metros más adelante de la planta Cemex. En este sitio, se observa un afloramiento perteneciente a la Formación Tiburón, el cual presenta varias familias de diaclasas, planos pulidos y superficies estriadas. En la parte superior del afloramiento, se distinguen depósitos cuaternarios en un contacto erosivo.

### **Figura 10**

*Panorámica de afloramiento con diaclasas y estrías de falla*

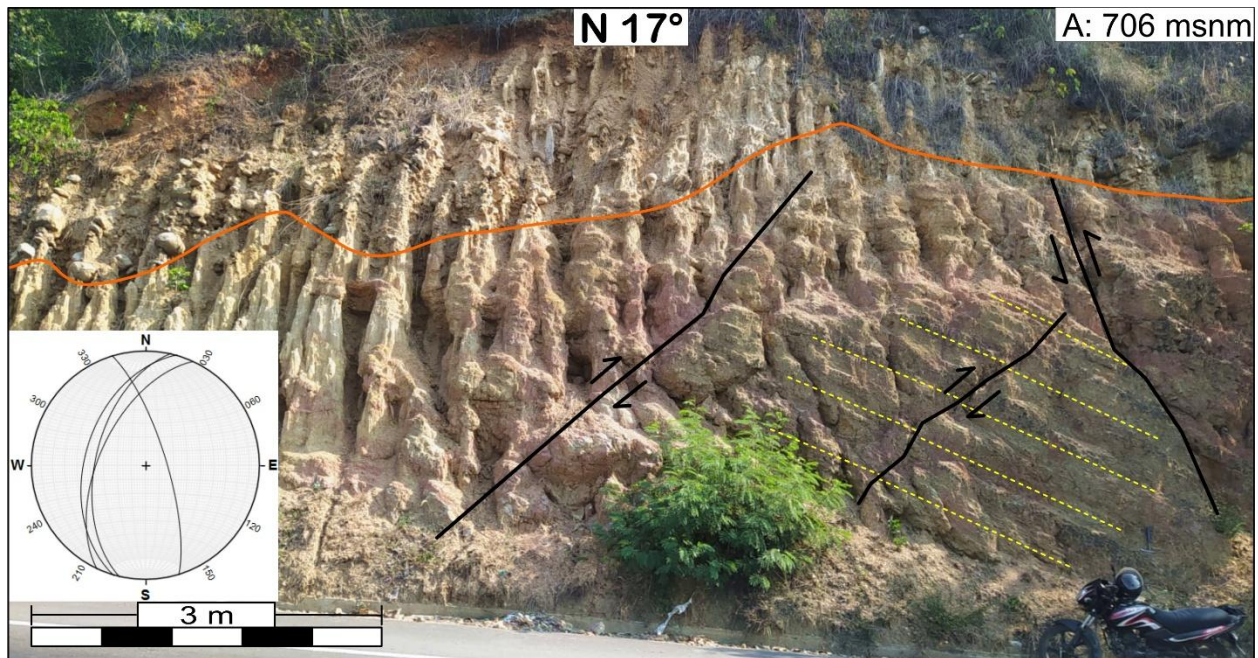


*Nota.* En la imagen anterior se presentan superficies con planos estriados (líneas negras) y familias de diaclasas (líneas azules) por toda la zona. Estación ECT26.

Metros más adelante, a lo largo de la misma vía se tiene al alcance la Formación Bucaramanga, como se muestra en la Figura 11. En este punto se observan fallas inversas cortando las rocas de la Formación Los Santos, sin embargo, no se evidencia de forma clara deformación en los depósitos cuaternarios presentes.

### **Figura 11**

*Contacto de la Formación Tiburón y el miembro Órganos*



*Nota.* Fallas inversas cortando rocas de la Formación Los Santos que está en contacto con el miembro Órganos de la Formación Bucaramanga (contacto línea naranja, estratificación líneas amarillas). Estación ECT27.

En la parte occidental del barrio Los Colorados, a lo largo de una vía sin pavimentar, se encuentra un afloramiento donde la remoción parcial del terreno debido a la actividad humana ha expuesto evidencias de actividad tectónica. Estas deformaciones han afectado depósitos de arcillas, arenas y gravas pertenecientes al miembro Órganos. En la Figura 12 se muestra un plano con presencia de estrías de falla.

### **Figura 12**

*Capa arcillo arenosa con planos estriados.*



*Nota.* La anterior imagen muestra una capa de sedimentos arcillo arenosos con coloraciones rojas, blancas, amarillas y grisáceas sobre la cual al inspeccionar se observan planos pulidos con presencia de estrías. Estación ETC29.

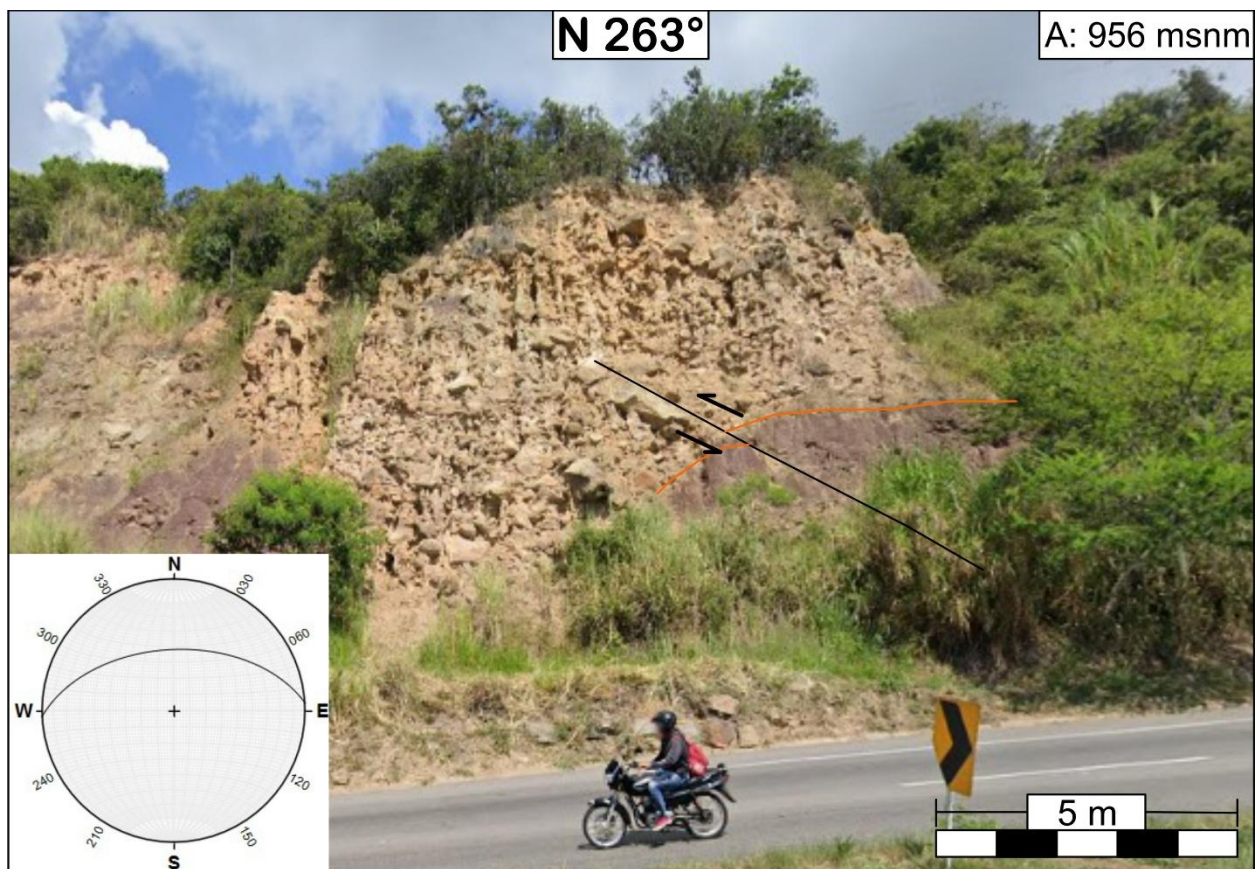
### ***5.3.1 Evidencias en la zona centro***

En la vía que conecta Girón con el Aeropuerto Palonegro, aproximadamente en el kilómetro 3.5, se encuentra un afloramiento compuesto por depósitos cuaternarios que abarcan una amplia variedad de tamaños de grano, desde arenas hasta bloques y presentan una coloración que

varía entre tonos amarillos, beige y grises (Figura 13). Subyacente a estos depósitos con un contacto discordante, también se encuentran expuestas capas pertenecientes a la Formación Girón con rocas que presentan coloración en tonos morado y gris. Una característica notable en este afloramiento es la presencia de una falla que atraviesa parte de la sección expuesta, esta falla muestra un desplazamiento en la litología evidenciado fácilmente por la coloración de los estratos.

### Figura 13

*Falla que corta depósitos cuaternarios*



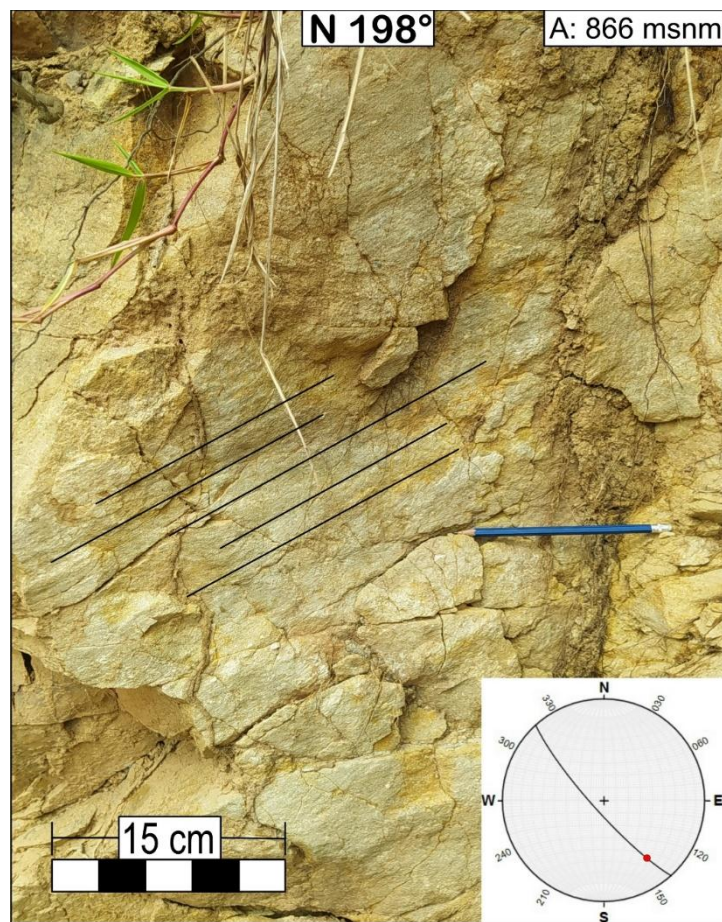
*Nota.* Afloramiento al costado de la vía que muestra fallamiento afectando depósitos cuaternarios. Estación ECT14.

En el km2 de la vía que conecta Girón con el aeropuerto Palonegro, específicamente sobre el segundo retorno, se encuentra una zona que presenta evidencias de actividad tectónica como,

diaclasas, planos estriados y pulidos, fracturas rellenas de cuarzo que se observan cortadas perdiendo su continuidad. Una de las manifestaciones más notable se ilustra en la Figura 9, allí se observa un depósito de sedimentos cuaternarios que evidencia la presencia de una falla. Este fenómeno se puede identificar gracias a las superficies de planos pulidos y estriados mostrados en la imagen.

### Figura 14

*Plano de falla pulido y estriado*



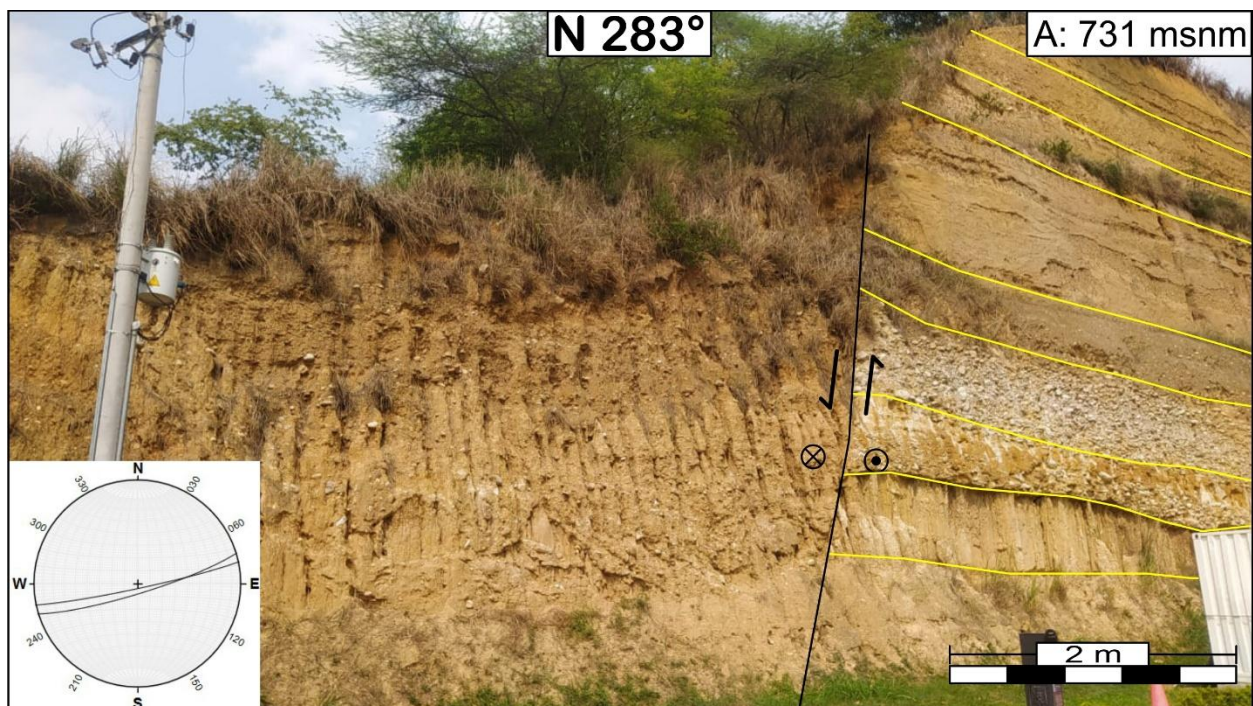
*Nota.* Plano de falla pulido y estriado, en depósitos sedimentarios. Estación ECT15.

Al costado oriental de la vía del Anillo Vial que conecta Floridablanca y Girón, a la altura de la estación de gasolina Primax Plaza San Juan, se encuentra un afloramiento que presenta una

notable exposición litológica. En este afloramiento se pueden apreciar claramente las distintas capas de sedimentos, las cuales exhiben una continuidad horizontal bien definida, lo que resalta su importancia para estudios estratigráficos y tectónicos. Además, en este sitio se identifica la falla representada en la Figura 15. Según los datos recolectados, esta falla presenta un comportamiento de desplazamiento lateral derecho con componente normal.

### Figura 15

*Afloramiento al costado del Anillo Vial sector Plaza San Juan*



*Nota.* En la anterior imagen se observa un cambio abrupto en la continuidad de las capas de sedimento y según los datos recolectado indican la presencia de una falla geológica. Estación ECT33.

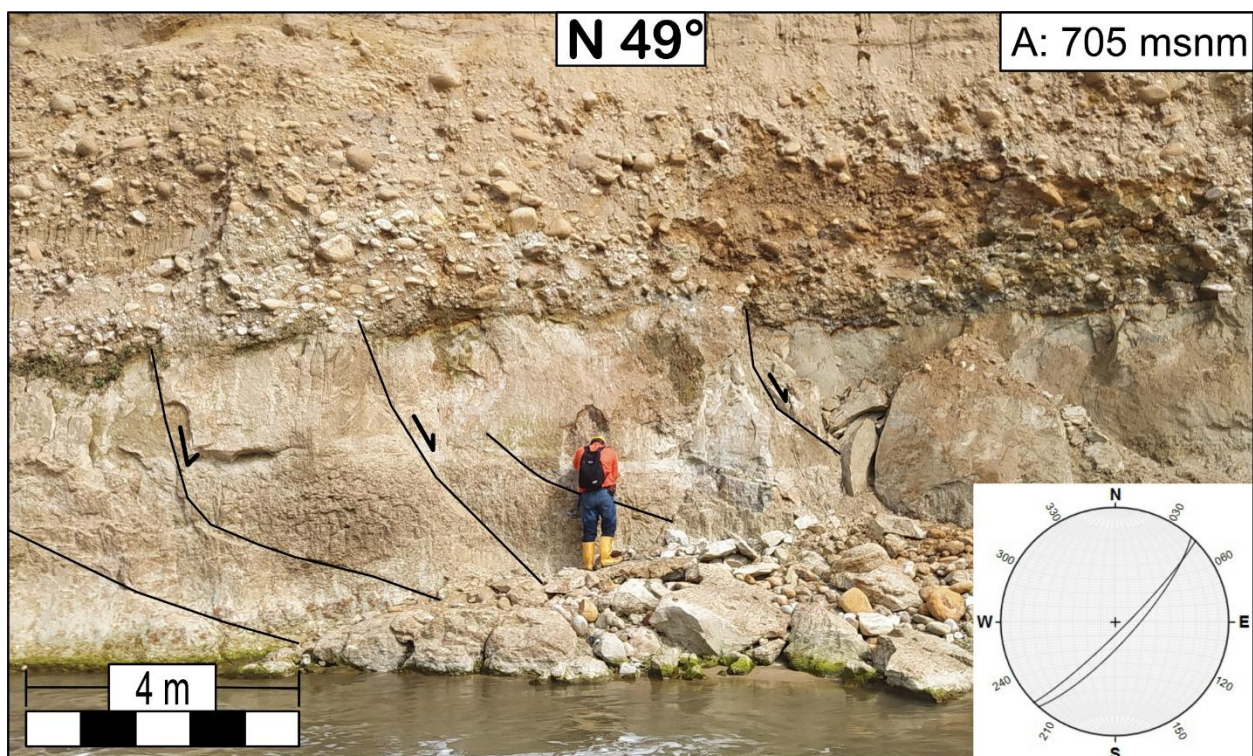
#### 5.3.1 Evidencias en la zona sur

A lo largo de la orilla del río Frio, en las proximidades del barrio Brisas del Río Frio, se encuentra un afloramiento en el cual la acción erosiva del río ha dejado en exposición una

secuencia de lineamientos que, al analizarlos y recopilar datos de campo, evidencia un desplazamiento que sugiere la presencia de una serie de fallas de carácter normal que se manifiestan de manera particularmente notable en el estrato más fino del afloramiento como se muestra en la Figura 16.

### Figura 16

*Afloramiento al borde del río, barrio Brisas del río Frio*



*Nota.* Afloramiento con presencia de fallas normales visibles principalmente en los sedimentos más finos. Estación ECT37.

### 5.4 Análisis de lineamientos geológicos

Con base en los datos estructurales recolectados durante la fase de campo se llevó a cabo un análisis detallado con el objetivo de establecer relaciones entre las estructuras identificadas y la geomorfología circundante a los afloramientos. Este enfoque permitió corroborar y reforzar la

evidencia de la presencia de fallas geológicas en la zona de estudio, logrando identificar patrones significativos en la interacción entre las estructuras tectónicas y las formas del relieve.

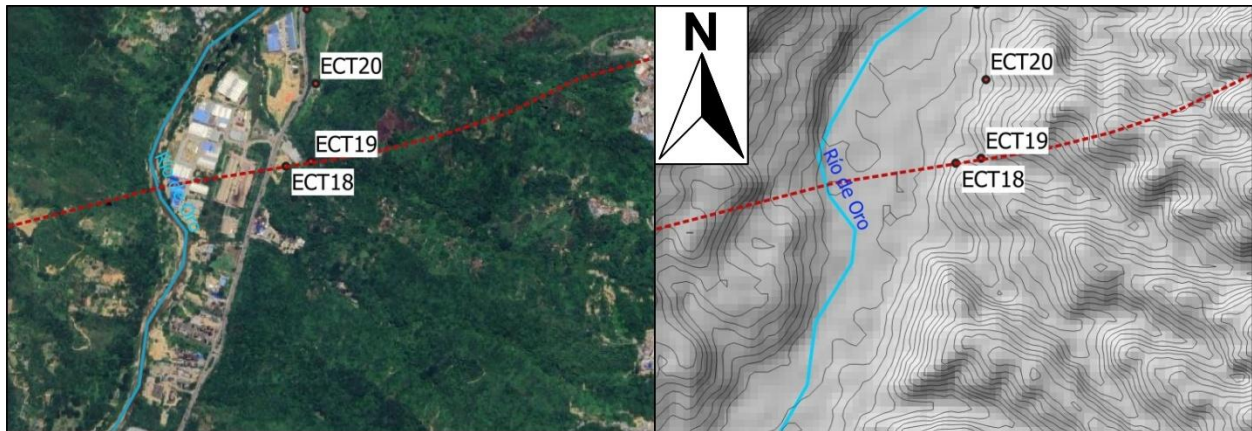
El análisis incluyó la comparación de las orientaciones y características de las estructuras recogidas en campo con elementos geomorfológicos como escarpes, drenajes lineales y cambios abruptos en la pendiente. Además, se evaluó la continuidad espacial de las fallas a través del terreno, estableciendo su posible extensión mediante la integración de observaciones en campo con herramientas complementarias, como imágenes satelitales y modelos digitales del terreno.

#### ***5.4.1 Análisis de lineamientos en la zona norte***

El estudio del afloramiento en la Estación ECT18 permitió la recopilación de indicios de actividad tectónica principalmente en su sector norte, donde se identificaron rasgos geológicos como familias de diaclasas y rocas deformadas y trituradas, indicativos de actividad tectónica. Posteriormente, en la Estación ECT19 ubicada sobre la quebrada Chapinero, se registraron datos estructurales que presentan una notable concordancia con los obtenidos en la Estación ECT18, (familias de diaclasas con actitud similar a las diaclasas de la estación anterior). Esta relación sugiere la continuidad de un lineamiento estructural que atraviesa la zona, como se muestra en la Figura 17.

#### **Figura 17**

*Lineamiento Parque Industrial II*

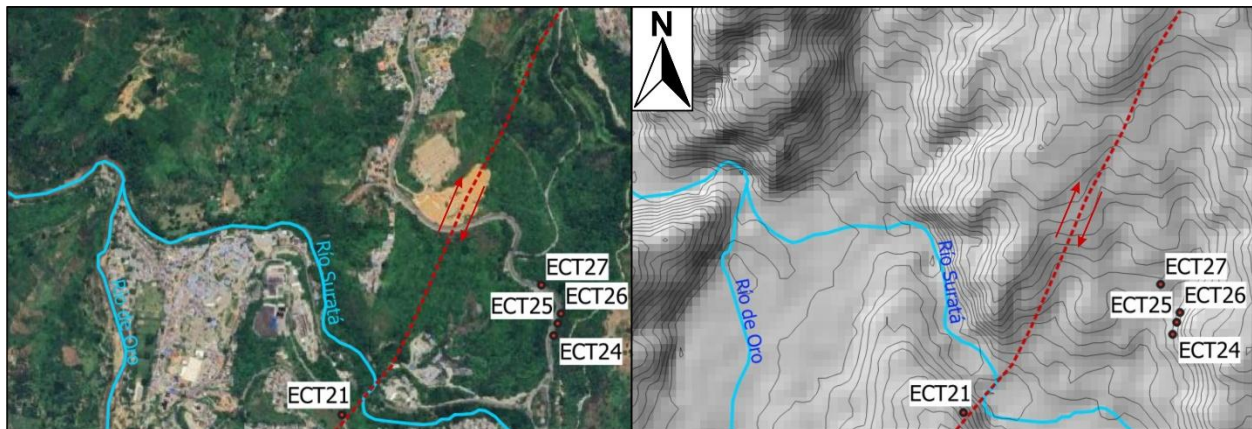


*Nota.* Posible falla determinada analizando los datos de la Estaciones ECT18 y ECT19

Como se observa en la Figura 18, el flujo del río Suratá experimenta una interrupción y un cambio en su dirección, lo que sugiere la influencia de estructuras geológicas en su curso. Este cambio coincide con el dato estructural registrado en la Estación ECT21 (Figura 9), donde se identificaron rasgos tectónicos como una falla aparentemente normal y algunas diaclasas que podrían estar controlando la morfología del río. La correspondencia entre la variación en el río Suratá y las mediciones realizadas en campo permite inferir que el lineamiento estructural identificado se prolonga hacia el norte del afloramiento.

### Figura 18

*Lineamiento barrio Café Madrid*

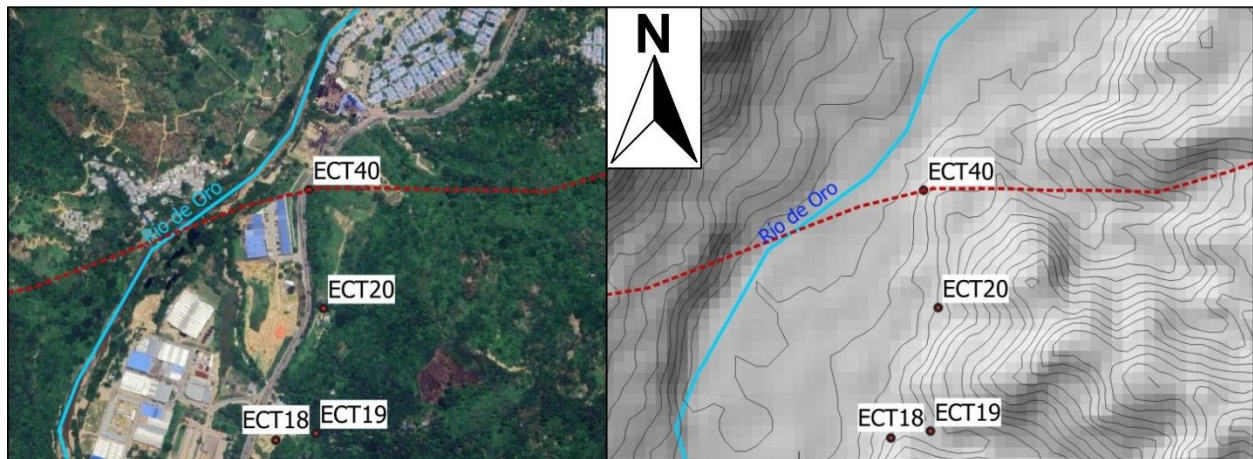


*Nota.* Cambio abrupto en la dirección de flujo del río, posiblemente asociado a la falla y diaclasas identificadas en la Estación ECT21.

Analizando los datos geológicos de la Estación ECT40, en conjunto con el estudio de la geomorfología del área, fue posible interpretar la existencia de un lineamiento estructural en el sector de la quebrada La Picha (Figura 19). Esta interpretación se sustenta en la concordancia entre las mediciones de diaclasas obtenidas y las evidencias geomorfológicas observadas en el terreno, tales como los cambios abruptos en la pendiente al NE de la estación registrada y la disposición de geformas como lomos de presión sugiriendo la presencia de una estructura geológica.

### Figura 19

#### *Lineamiento Quebrada La Picha*



*Nota.* Lineamiento establecido según los datos recolectados en la Estación ECT40 y la geomorfología circundante.

#### **5.4.2 Análisis de lineamientos en la zona centro**

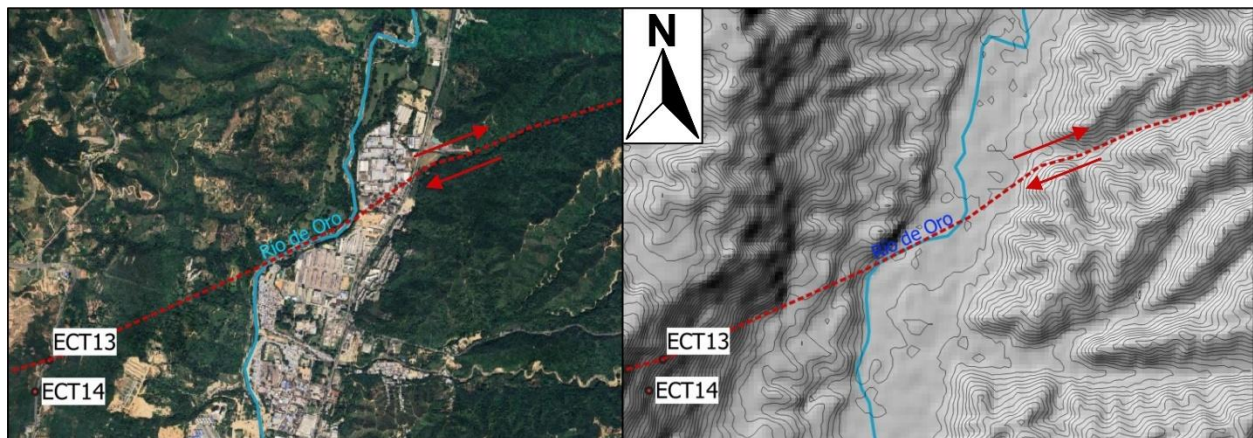
En la estación ECT13, ubicada a lo largo de la vía que conecta Girón con el Aeropuerto Palonegro, se identificó un plano de falla bien definido (rumbo  $74^\circ$ / buzamiento  $70^\circ$  SE) con presencia de estrías (Rake  $160^\circ$ ) y algunas diaclasas. Al analizar esta estructura con imágenes

satelitales de Google Earth y mapas de sombras, se encontró una correlación significativa entre su orientación y un cambio en el flujo del río de Oro en el sector Centro Abastos (Figura 20).

Esto sugiere que la falla identificada podría estar desempeñando un papel determinante en la dinámica fluvial de la zona, influenciando la dirección del cauce y posiblemente condicionando la estabilidad de los terrenos circundantes. Además, la presencia de esta falla geológica representa un indicio para comprender la evolución tectónica del área, ya que su continuidad y actividad podrían estar asociadas a otros lineamientos estructurales de la región.

### Figura 20

*Lineamiento codo Rio de Oro sector Centro Abastos*



*Nota.* Falla inferida con base en los datos recolectados en la Estación ECT13

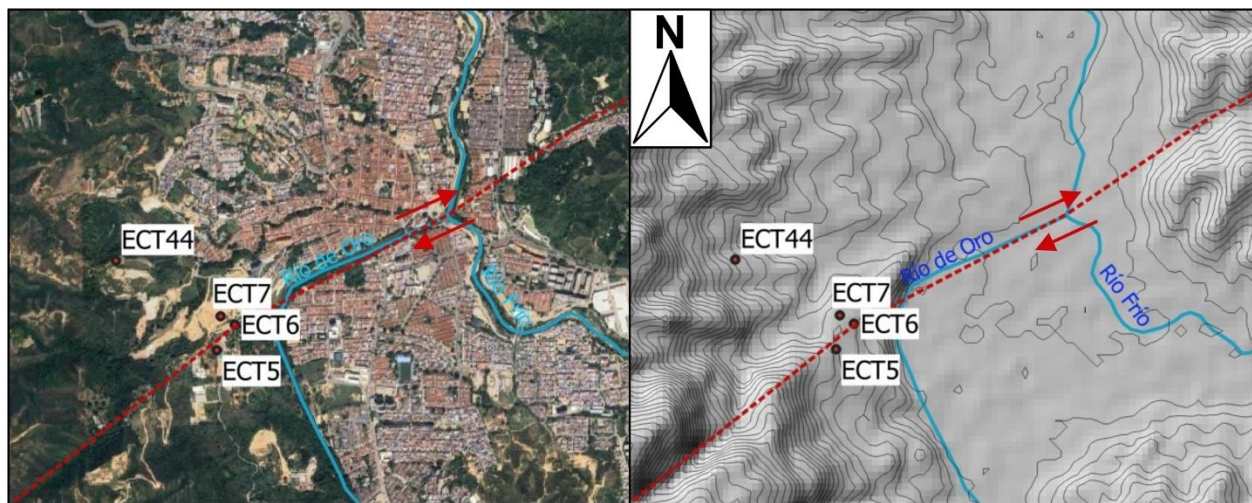
#### 5.4.3 Análisis de lineamientos en la zona sur

En la estación ECT6 se registraron datos estructurales de diaclasas, rocas deformadas y fracturadas, que evidencian una orientación consistente con el cambio de dirección observado en el flujo del río de Oro en el sector del Parque El Gallineral. Esta correlación sugiere que la variación en el curso del río podría estar influenciada por una estructura subyacente posiblemente vinculada a una falla activa o heredada en la región (Figura 21). El estudio de estas mediciones permite inferir

la presencia de un lineamiento geológico que podría estar controlando la morfología fluvial ya que adicionalmente se observa un tramo recto del río. Investigaciones complementarias con análisis geofísicos, podrían ayudar a caracterizar con mayor precisión la extensión, cinemática e importancia del lineamiento dentro del contexto tectónico regional.

### Figura 21

*Lineamiento codo Rio de Oro sector Parque El Gallineral*



*Nota.* Falla inferida con base en los datos recolectados en la Estacione ECT6.

### 5.5 Planteamiento de fallas geológicas

El estudio el análisis de lineamientos y datos estructurales permitió identificar la presencia de cinco fallas a lo largo de la zona occidental y norte del área de estudio. Estas estructuras se denominan en este estudio como Falla Parque Industrial II, Falla La Cemento, Falla Quebrada La Picha, Falla Centro Abastos y Falla Parque El Gallineral representan rasgos tectónicos significativos que pueden estar asociados con la evolución geodinámica de la región y la actividad neotectónica reciente.

Adicionalmente, los datos obtenidos respecto a la orientación, inclinación y demás características estructurales de los planos de la Falla de Bucaramanga, la Falla Río de Oro y la

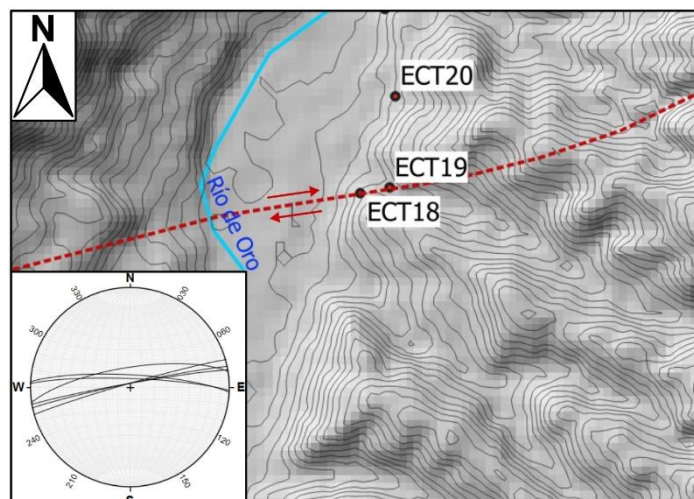
Falla del Suárez muestran concordancia con los valores reportados en la literatura. El reconocimiento y análisis de estas estructuras permite comprender la influencia tectónica en la configuración del relieve, la estabilidad geotécnica del terreno y el potencial impacto en la sismicidad de la región siendo útil como referencia para la gestión de riesgo y la planificación territorial.

### 5.5.1 Falla Parque Industrial II

Esta falla se infiere a partir del análisis de la información obtenida en las estaciones de campo ECT18 y ECT19, los cuales proporcionan datos de diaclasas con tendencia  $260^\circ$  de azimut de rumbo. Estos datos han sido complementados con el estudio de la geomorfología de la zona, el lineamiento mostrado en la Figura 17, es un factor relevante que respalda la existencia de esta falla, adicionalmente la alteración en el comportamiento del flujo del Río de Oro en las proximidades del Parque Industrial II, sugiere la influencia de procesos tectónicos. En la Figura 22, se presenta el trazo posible de la falla y la proyección estereográfica de los datos de diaclasas hallados en las estaciones mencionadas.

### Figura 22

#### *Falla Parque Industrial II*



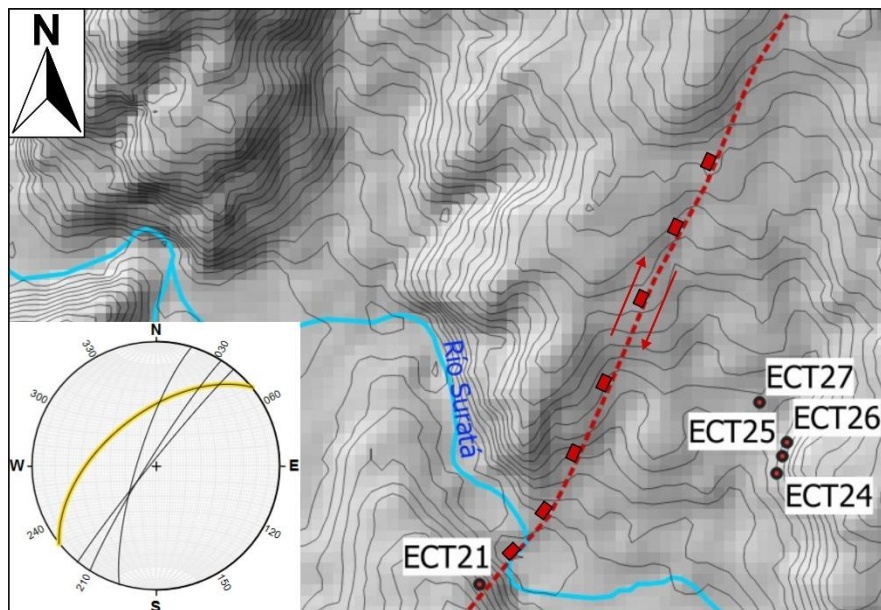
*Nota.* Falla inferida analizando los datos de las Estaciones ECT18 y ECT19

### 5.5.2 Falla La Cemento

Esta falla se determina con base en el análisis de los datos una falla normal y diaclasa, recolectadas en las estaciones de campo ECT21 y ECT22, brindando indicios sobre su orientación y posible actividad. Estos datos se complementaron con el estudio geomorfológico de la zona (Figura 18), permitiendo identificar alteraciones en la dinámica fluvial del Río Suratá, es allí donde se halla un cambio abrupto en la dirección del cauce mostrando patrones anómalos. Este rasgo sugiere la existencia de movimientos diferenciales en el terreno asociado posiblemente a la reactivación de estructuras preexistentes o generación de nuevas fracturas producto de esfuerzos tectónicos recientes. En la Figura 23, se presenta el trazo posible de la falla y la proyección estereográfica de los datos de diaclasas y plano de falla hallados en las estaciones mencionadas.

### Figura 23

#### *Falla La Cemento*



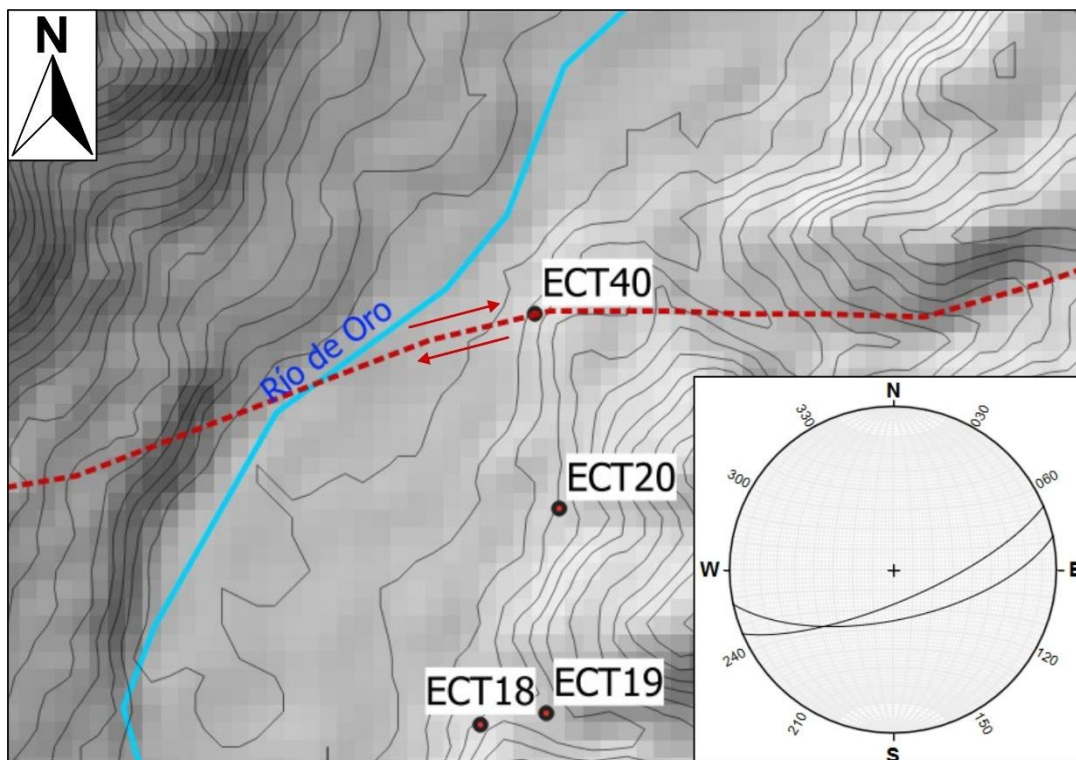
*Nota.* Falla inferida analizando los datos de las Estaciones ECT21 y ECT22

### 5.5.3 Falla Quebrada La Picha

Esta falla se propone con base en el estudio de la información obtenida en la estación de campo ECT40 donde se identificaron indicios de la presencia de una posible estructura tectónica en la zona. Estos indicios incluyen alineación en los datos de diaclasas con tendencia de azimuth de rumbo  $72^\circ$ , así como variaciones en la estratigrafía local como es el caso de presencia de harina de falla. Adicionalmente, mediante las observaciones de imágenes satelitales se identificó un patrón geomorfológico que se tomó como guía para delinear la falla. En la Figura 24, se presenta el trazo posible de la falla y la proyección estereográfica de los datos de diaclasas medidos en la estación ECT40.

**Figura 24**

*Falla Quebrada La Picha*



*Nota.* Falla inferida analizando los datos de la Estación ECT40

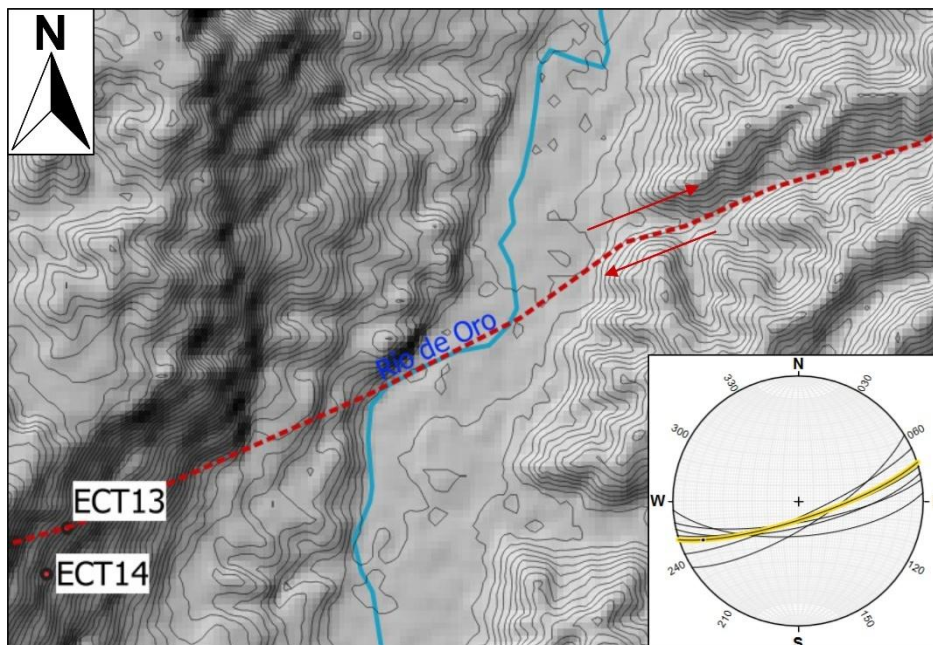
#### 5.5.4 Falla Centro Abastos

La presencia de esta falla y su caracterización se establece a partir del análisis de la información recolectada en las estaciones de campo ECT13 y ECT14, entre los cuales se tiene un plano de falla con presencia de estrías cuya cinemática se determinó de carácter dextral inverso y proporciona información indicadora de la orientación y geometría de la falla, además los datos recolectados de diaclasas presentan una tendencia en el azimut de rumbo de  $76^\circ$ . Estos datos se complementaron con el estudio de la geomorfología circundante, permitiendo establecer una relación entre la presencia de la falla y las modificaciones en el relieve.

Uno de los principales indicadores geomorfológicos de la existencia de esta falla es la alteración del flujo del Río de Oro en las inmediaciones de Centro Abastos. Estas variaciones podrían estar asociadas con desplazamientos del terreno generados por esta falla.

**Figura 25**

*Falla Centro Abastos*



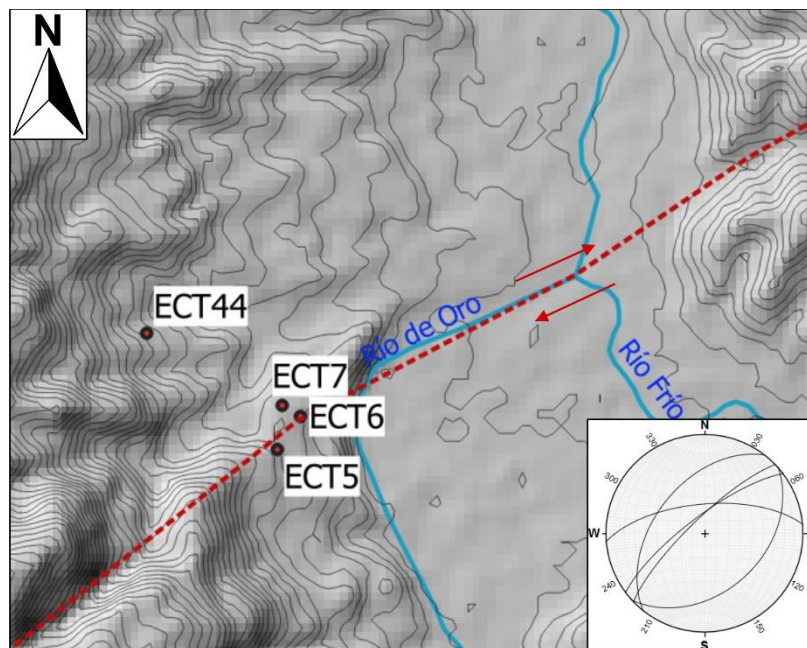
*Nota.* Falla inferida analizando los datos de las Estaciones ECT13 y ECT14

### 5.5.5 Falla Parque El Gallineral

La presencia de esta falla se ha determinado a partir del análisis de la información recopilada en las estaciones de campo ECT5, ECT6, y ECT7, en estas estaciones se pudieron observar rocas fracturadas y deformadas, familias de diaclasas cuyo azimut de rumbo presenta tendencia  $242^\circ$ , estos datos proporcionan información clave sobre la estructura y orientación de la falla. Además, las observaciones geomorfológicas realizadas en la zona indican el cambio abrupto en la dirección del flujo del río, observable en las inmediaciones del parque El Gallineral, junto con su trayecto recto en la zona. Este análisis combinado de los datos estructurales y geomorfológicos permite inferir la existencia de esta falla.

### Figura 26

#### *Falla Parque El Gallineral*



*Nota.* Falla inferida analizando los datos de las Estaciones ECT5, ECT6 y ECT7

## 5.6 Análisis de datos estructurales

Para realizar un análisis detallado de los datos estructurales recolectados en el área de estudio, se optó por dividir la región en tres zonas principales: zona norte, zona centro y zona sur como se muestra en la Figura 7. Esta clasificación permitió organizar y analizar los datos de manera más eficiente, agrupando las estaciones de cada zona según su ubicación geográfica y características geológicas.

Cada conjunto de datos recopilado en estas zonas fue sometido a un análisis estructural generando diagramas de rosas y densidad de polos para los datos de diaclasas, en el caso de los planos estriados, la toma de datos se concentró principalmente en los sedimentos areno-arcillosos y lodo-arenosos del miembro Órganos, cuyas características litológicas favorecieron una mejor medición de los elementos cinemáticos, a partir de esta información se generaron diagramas de análisis R. Dihedron y diagramas de rosa. Permitiendo identificar patrones, tendencias y correlaciones en la distribución de diaclasas, planos estriados y otros rasgos geológicos.

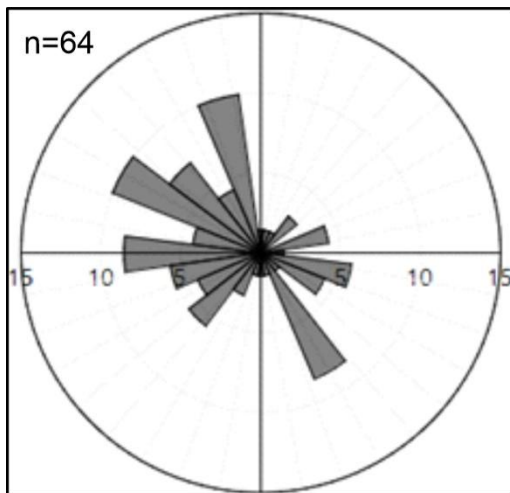
### 5.6.1 Zona norte

En la zona norte se obtuvieron 64 datos de diaclasas y 6 datos de planos estriados dando como resultado los diagramas mostrados a continuación.

El diagrama de rosa mostrado en la Figura 27 se evidencian tendencias en la orientación de diaclasas en sentido  $N16^{\circ}W$ ,  $N60^{\circ}W$  y  $S30^{\circ}E$ . Estos datos se pueden asociar principalmente a la actividad de la Falla Bucaramanga la cual genera múltiples rupturas en el área aledaña ya que la mayoría de los datos son paralelos a la actitud NNW-SSE característica de esta falla además otra cantidad importante de datos coinciden con fracturas tipo Riedel de este sistema. En la Figura 28 se observa el diagrama de densidad de polos en el cual indica predominio de altos grados de buzamiento.

**Figura 27**

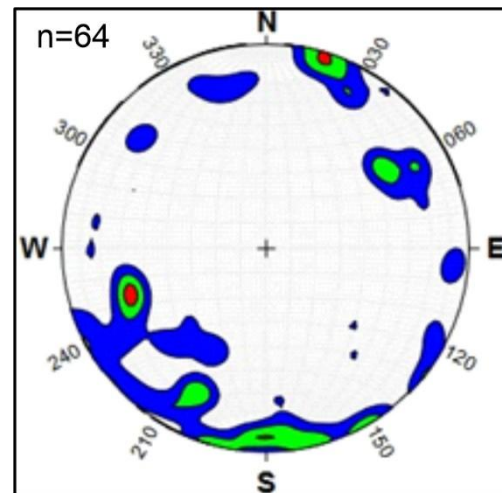
*Diagrama de rosa de los datos de diaclasas tomados en la zona norte*



*Nota.* Orientación en azimut de rumbo.

**Figura 28**

*Diagrama de densidad de polos determinado para la zona norte*

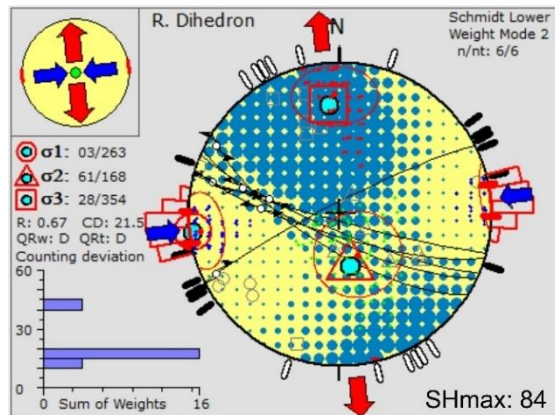


*Nota.* Densidad de polos para los datos de diaclasas.

Para el análisis de planos estriados se recolectaron un total de seis datos en la zona norte. Estos datos fueron procesados en el software Win-Tensor, obteniéndose el gráfico mostrado en la Figura 29. El SHmax obtenido tiene orientación  $84^\circ$ , los sigmas principales son:  $\sigma_1 = 263^\circ/03^\circ$ ,  $\sigma_2 = 168^\circ/61^\circ$  y  $\sigma_3 = 354^\circ/28^\circ$ , lo cual evidencia un régimen de esfuerzos compresivo transcurrente. Los planos de falla identificados se orientan predominantemente en dirección NW-SE, lo que sugiere una posible relación con la Falla de Bucaramanga, aunque esta orientación difiere ligeramente de la característica NNW-SSE atribuida a dicha estructura es posible que se trate de fallas menores tipo Riedel y anti-Riedel asociadas cinemáticamente al sistema principal. Así mismo se identificó un plano estriado con orientación SW-NE y componente dextral, lo que indica la presencia de fallas transversales a la Falla de Bucaramanga en este sector. Los diagramas de rosa generados a partir de los planos estriados de la zona norte se muestran en la Figura 30.

**Figura 29**

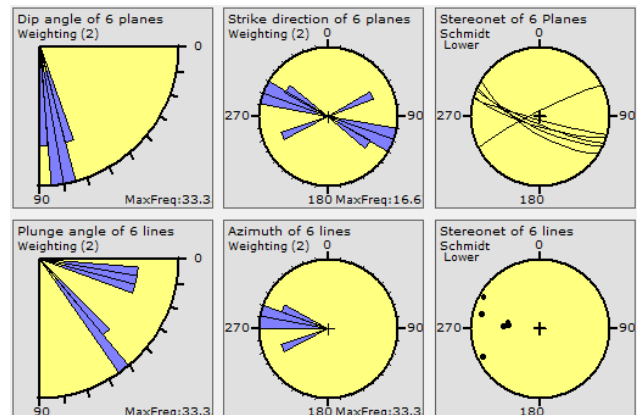
*Tensor de esfuerzo determinado a partir de los planos estirados en la zona norte*



*Nota.* Diagrama R. Dihedron zona norte.

**Figura 30**

*Diagramas de rosa determinados a partir de los planos estirados en la zona norte*



*Nota.* Diagramas de rosa 6 planos estirados zona norte.

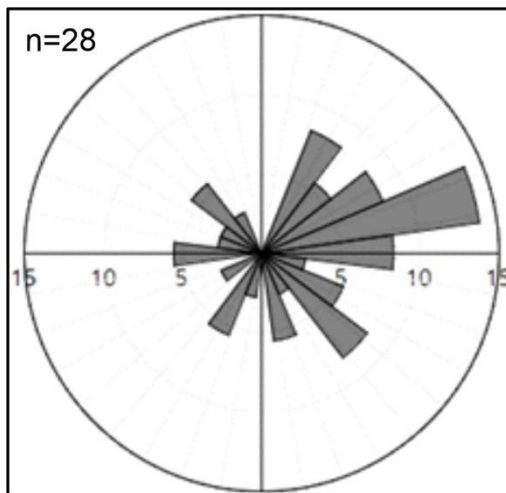
**5.6.2 Zona centro**

En la zona centro se obtuvieron 28 datos de diaclasas y 8 datos de planos estriados dando como resultado los diagramas mostrados a continuación.

El diagrama de rosa mostrado en la Figura 31 evidencia tendencias en la orientación de diaclasas en sentido N30°E, N75°E y S45°E. Estos datos se pueden asociar a la Falla del Suarez, la Falla Rio de Oro y a fallas secundarias con dirección SW-NE. En la Figura 32 se observa el diagrama de densidad de polos en el cual indica predominio de buzamientos de bajo ángulo para los datos asociados a la Falla del Suarez y buzamientos de alto ángulo para las fallas secundarias con dirección SW-NE.

**Figura 31**

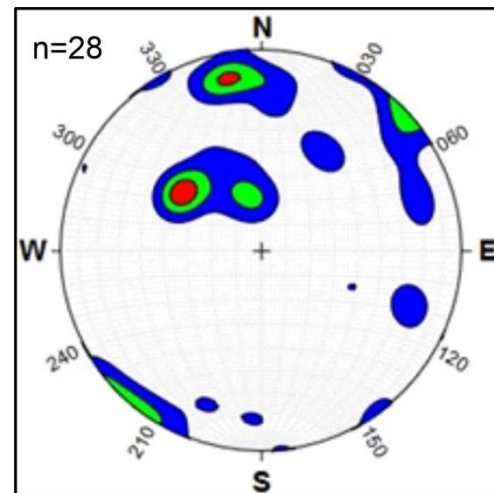
*Diagrama de rosa de los datos de diaclasas tomados en la zona centro.*



*Nota.* Orientación en azimut de rumbo.

**Figura 32**

*Diagrama de densidad de polos determinado para la zona centro.*

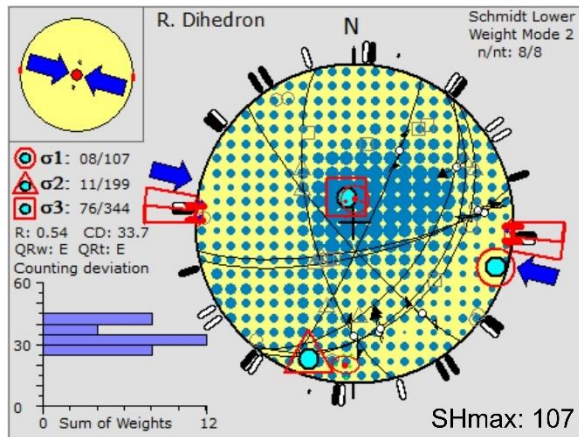


*Nota.* Densidad de polos para los datos de diaclasas.

En el análisis de planos estriados en la zona centro se contó con un total de ocho datos recolectados. Estos datos fueron procesados en el software Win-Tensor, obteniendo los gráficos mostrados en las Figuras 33 y 34. El SHmax obtenido tiene orientación  $107^\circ$ , los sigmas principales son:  $\sigma_1 = 107/08$ ,  $\sigma_2 = 199/11$  y  $\sigma_3 = 344/76$ , lo cual evidencia un régimen de esfuerzos compresivo. Los planos de falla identificados se orientan predominantemente en dirección NE-SW, lo que sugiere una posible relación con la Falla del Suarez, ya que presentan cinemática inversa y de algunos con cinemática sinistral. Aunque cabe mencionar la presencia de dos planos con orientación E-W que muestran cinemática dextral indicando fallas en este sentido siendo ortogonales a la Falla del Suarez y la Falla Río de Oro.

**Figura 33**

*Tensor de esfuerzo determinado para la zona centro*



*Nota.* Diagrama R. Dihedron zona centro.

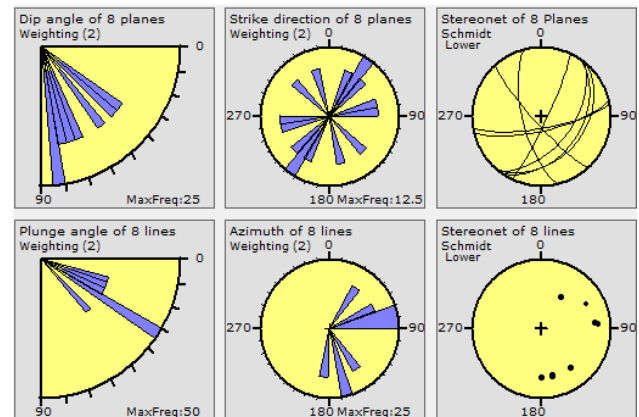
### 5.6.3 Zona sur

En la zona sur se obtuvieron 51 datos de diaclasas y 9 datos de planos estriados dando como resultado los diagramas mostrados a continuación

El diagrama de rosa mostrado en la figura 26 evidencia tendencias en la orientación de diaclasas en sentido N70°W y N45°E. Estos datos se pueden asociar a la falla del Suarez, la falla Rio de Oro y a fallas secundarias con dirección W-E. En la figura 27 se observa el diagrama de densidad de polos en el cual indica predominio de buzamientos de entre 10°-40° y 80°-90°.

**Figura 34**

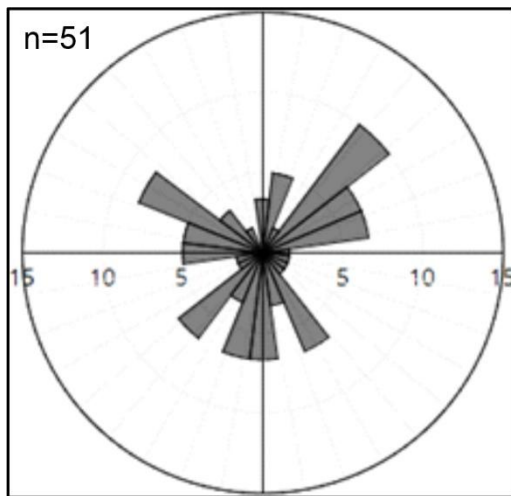
*Diagramas de rosa determinados a partir de los planos estriados en la zona centro*



*Nota.* Diagramas de rosa 8 planos estriados zona centro.

**Figura 35**

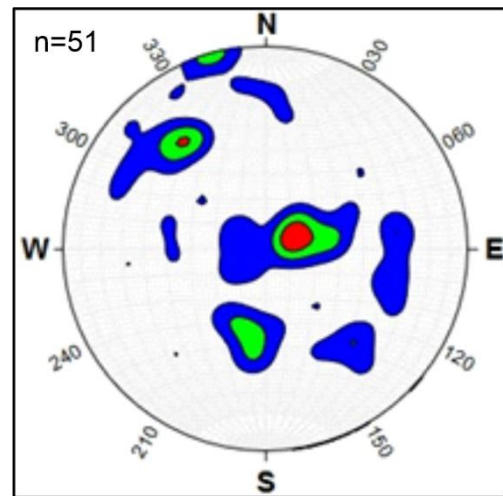
*Diagrama de rosa de los datos de diaclasas tomados en la zona sur.*



*Nota.* Orientación en azimut de rumbo.

**Figura 36**

*Diagrama de densidad de polos determinado para la zona sur.*

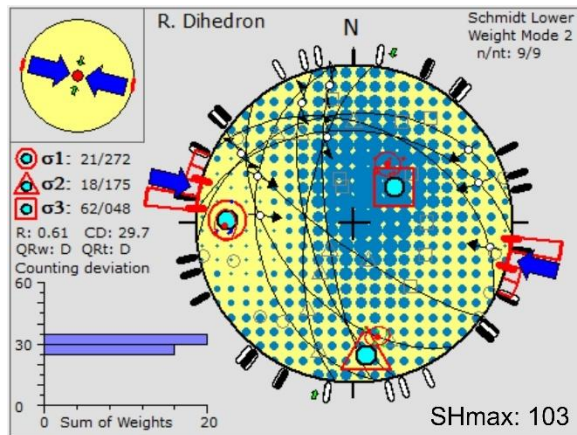


*Nota.* Densidad de polos para los datos de diaclasas.

En la zona sur se recolectaron nueve mediciones de planos estriados, las cuales fueron analizadas con el software Win-Tensor, a partir de este procesamiento se generaron los gráficos presentados en la figura 28 y 29. El SHmax obtenido tiene orientación  $103^\circ$ , los sigmas principales son:  $\sigma_1 = 272/21$ ,  $\sigma_2 = 175/18$  y  $\sigma_3 = 48/62$ , lo que indica un régimen de esfuerzos compresivo transcurrente. Los planos estriados analizados muestran una orientación predominante en dirección NNW-SSE, evidencia de una asociación con la Falla del Suarez y la Falla Rio de Oro. Adicionalmente, se identificaron algunos planos con orientación W-E, esta variabilidad sugiere existencia de fallas secundarias que podrían estar relacionadas con ajustes locales del campo de esfuerzos.

**Figura 37**

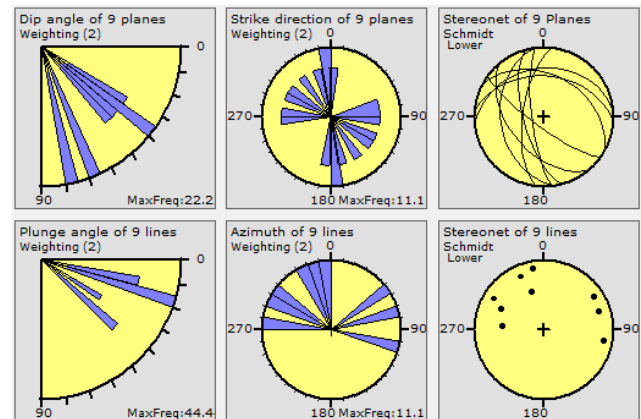
*Tensor de esfuerzo determinado para la zona sur*



*Nota.* Diagrama R. Dihedron zona sur.

**Figura 38**

*Diagramas de rosa determinados a partir de los planos estirados en la zona sur*



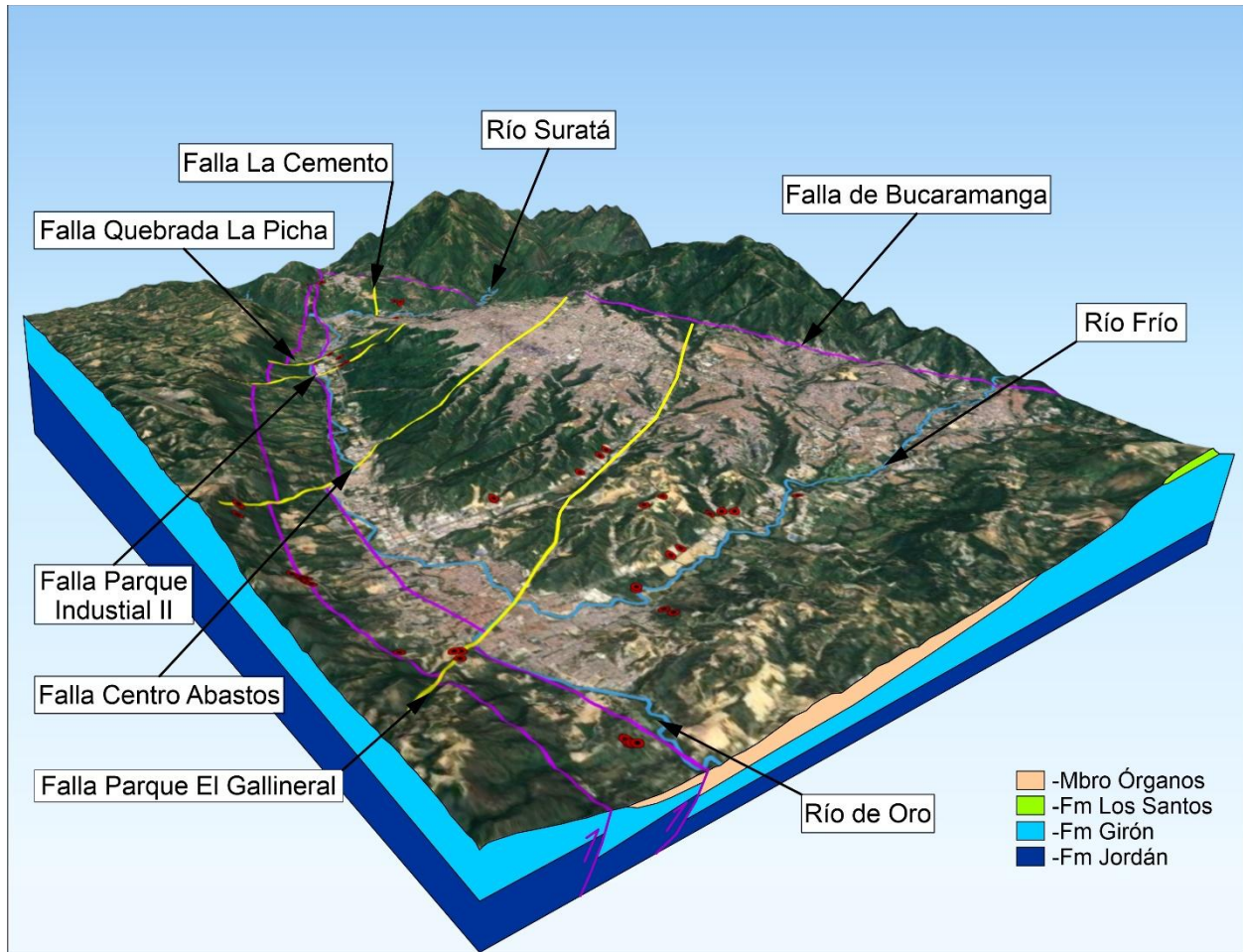
*Nota.* Diagramas de rosa 9 planos estirados zona sur.

## 5.7 Modelo estructural

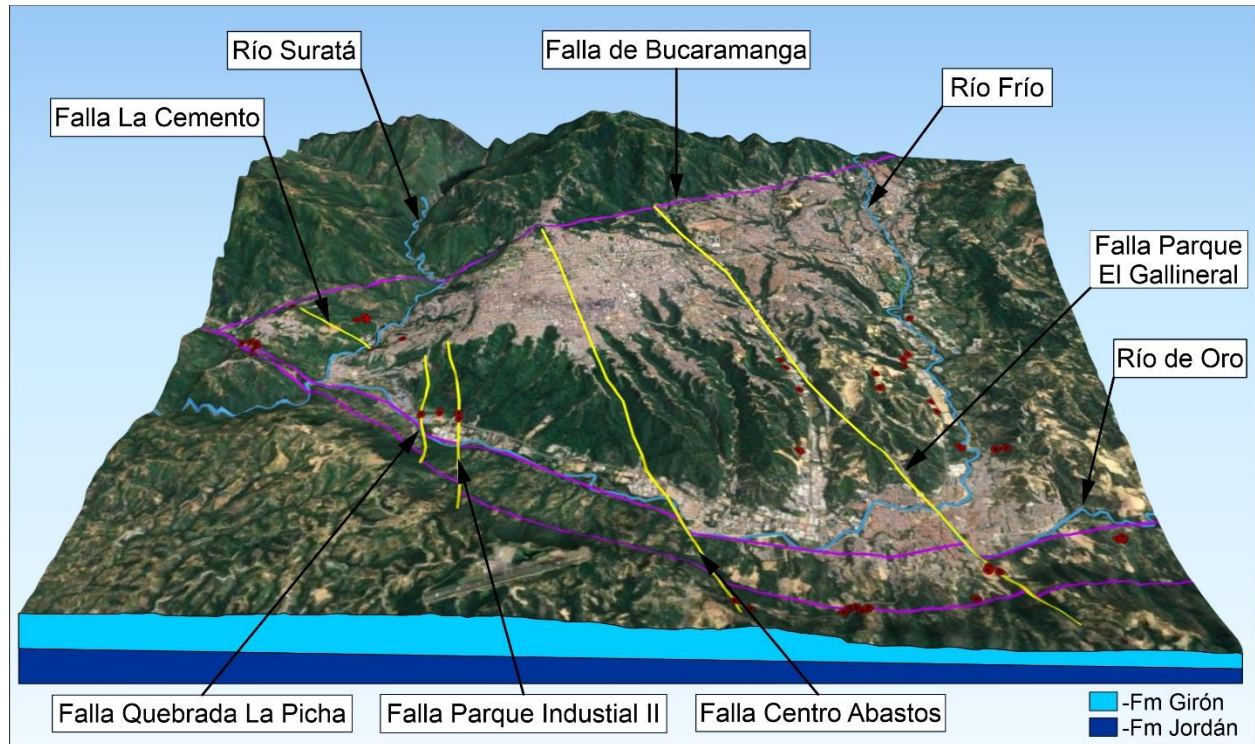
A partir del análisis de datos obtenido y la información recopilada de diversos autores, se propone un modelo estructural que integra el conocimiento existente. Este modelo tiene como objetivo caracterizar el contexto geológico y tectónico de la cuenca en la que se depositó el Abanico de Bucaramanga, considerando la evolución y procesos tectónicos recientes que influyeron en su configuración. Se establece una relación significativa entre los datos obtenidos y las descripciones propuestas por Julivert (1958), Niño & Vargas (1992), Rosello et al. (2011), Clavijo & Vargas (2017) y Velandia (2017) donde los resultados corroboran el ambiente sintectónico del depósito de la formación Bucaramanga, evidencian las variación en los tensores de esfuerzo de la zona y confirman la existencia de fallas transversales a la Falla de Bucaramanga y la Falla del Suarez, generando un patrón de ruptura en bloques y un fallamiento tipo dominó.

**Figura 39**

*Modelo estructural vista desde el SW*



*Nota.* El modelo muestra la integración de la información consultada y el planteamiento de cinco lineamientos según los datos recolectados.

**Figura 40***Modelo estructural vista desde el W*

*Nota.* Vista que ilustra de manera más clara los lineamientos planteados durante la investigación.

## 6. Discusión

En esta sección se debaten los principales hallazgos sobre la neotectónica de la Formación Bucaramanga, contrastándolos con los modelos estructurales previos y estudios relevantes para la región. El análisis de la cinemática de las fallas que afectan la Formación Bucaramanga confirma un predominio de estructuras de rumbo sinistral con componente inverso, lo cual sugiere una dinámica transpresiva dominante en el marco tectónico actual.

Examinando la evolución de la zona de estudio se concuerda con los planteamientos realizados por Julivert (1958) y Rossello et al. (2011) en los cuales proponen la existencia de una cuenca inicialmente extensional que fue sometida a un régimen compresivo posibilitando el depósito sintectónico del abanico de Bucaramanga, además se destacan los aportes realizados por París & Romero (1994), París et al. (2000) en cuanto al estudio y análisis de la Falla del Suarez y la Falla de Bucaramanga donde plantean actividad tectónica cuaternaria para estas fallas, esta afirmación se confirma con el reporte de planos estriados encontrados durante esta investigación sobre depósitos de la Formación Bucaramanga.

El análisis de tensores de esfuerzos constituye una herramienta fundamental para la comprensión de la evolución tectónica y la configuración actual de la cuenca de Bucaramanga en esta investigación se determinaron tres tensores de esfuerzos a partir de la medición de planos estriados en depósitos cuaternarios, la orientación del SHmax determinado en los tensores sigue una tendencia E-W, concordando con los tensores en depósitos cuaternarios reportados por Taboada et al. (2000) para esta zona. Esta información también es corroborada por el análisis de tensores realizado por Velandia (2017).

Teniendo en cuenta el estudio realizado por Struth et al. (2020) sobre la variación en la configuración actual de la red de drenaje en la región, se destacan los indicios encontrados durante esta investigación donde se reportan distintas afectaciones sobre la configuración de drenaje en el Río Surata y el Río de Oro derivados de la actividad tectónica presente en la zona, donde las deformaciones han alterado las pendientes de los ríos y la posición de las divisorias de aguas, favoreciendo la reorganización de la red de drenaje.

El planteamiento de las fallas en esta investigación se consolida como un precedente para futuros estudios estructurales y tectónicos en la Formación Bucaramanga. No obstante, deben

reconocerse las limitaciones metodológicas enfrentadas, tales como el acceso restringido a ciertas zonas por condiciones topográficas adversas, la disponibilidad de herramientas de alta precisión para la toma de datos estructurales y geocronológicos, además de la escasez de estudios multidisciplinarios en el área.

## 7. Conclusiones

Los tensores de esfuerzos encontrados en el área de estudio fueron: para la zona norte:  $\sigma_1 = 263/03$ ,  $\sigma_2 = 168/61$  y  $\sigma_3 = 354/28$ , para la zona centro:  $\sigma_1 = 107/08$ ,  $\sigma_2 = 199/11$  y  $\sigma_3 = 344/76$  y para la zona sur:  $\sigma_1 = 272/21$ ,  $\sigma_2 = 175/18$  y  $\sigma_3 = 48/62$ . Lo cual indica un régimen de esfuerzos predominantemente transpresivo con un componente compresivo oeste-este, las variaciones en la orientación de los tensores a lo largo del eje norte-sur del área de estudio sugieren un campo tectónico complejo donde las deformaciones responden a condiciones locales de interacción entre fallas mayores y secundarias.

El depósito de la Formación Bucaramanga se desarrolló en un contexto sintectónico, lo que implica que la sedimentación ocurrió de manera simultánea a la actividad tectónica. Esta interpretación se sustenta en la evidencia de estructuras deformadas, variaciones en la inclinación de los estratos como es el caso de los estratos mostrados en la estación ECT18 y los cambios en el espesor de la unidad, destacando un engrosamiento hacia la zona distal respecto al ápice del abanico. Dichas evidencias sugieren una acomodación tectónica activa durante el proceso de sedimentación.

La investigación permitió construir un modelo estructural para la cuenca de Bucaramanga, el cual tiene alta similitud con el modelo en domino propuesto por Velandia (2017), en este modelo

predominan las fallas de rumbo sinistral con componentes transpresivos, como la Falla de Bucaramanga y la Falla del Suarez. Asimismo, se identificó la presencia de fallas dextrales ortogonales a las fallas mayores, como lo afirma previamente la investigación de Clavijo y Vargas (2017) estas fallas menores configuran un sistema en dominó asociado a la dinámica transcurrente.

Las fallas propuestas en el área de estudio son: Falla Parque Industrial II, Falla Quebrada La Picha, Falla La Cemento, Falla Centro Abastos y Falla Parque El Gallineral, se asume que estas estructuras presentan una cinemática dextral, estando confinadas entre la Falla de Bucaramanga y la Falla del Suarez, siendo posibles causantes de algunos movimientos en masa ocurridos al interior del Abanico de Bucaramanga, sin embargo, se requieren estudios adicionales para corroborar esta afirmación.

## **8. Recomendaciones**

A pesar de los avances en la caracterización geológica de la Formación Bucaramanga, aún persisten importantes vacíos en el conocimiento de su evolución y estructura debido a la falta de estudios detallados en diversas áreas de la región. Muchas zonas presentan condiciones de difícil acceso, lo que limita la recolección de datos de campo y dificulta el análisis directo de las estructuras geológicas y estratigráficas. Para abordar esta problemática, es fundamental el uso de tecnologías avanzadas como imágenes satelitales de alta resolución, fotogrametría y sensores remotos que permitan el monitoreo y análisis de las zonas inaccesibles.

Además, es necesario desarrollar investigaciones más integrales que implementen y correlacionen diversas metodologías geocientíficas. Se requiere la aplicación de técnicas

geofísicas, estratigráficas, estructurales y temporales con el fin de obtener una reconstrucción más precisa del marco tectónico y sedimentológico de la formación.

Otro aspecto relevante a considerar es el análisis de datos geotécnicos obtenidos a partir de grandes obras de infraestructura desarrolladas en la zona urbana. La intervención antrópica, mediante excavaciones profundas, han expuesto secciones de la Formación Bucaramanga normalmente permanecerían ocultas, ofreciendo una oportunidad para su evaluación directa. Si estos registros se estudian de forma sistemática, pueden aportar información valiosa sobre la litología, el comportamiento mecánico y la estabilidad estructural, constituyéndose en una fuente complementaria para futuras investigaciones geológica y geotécnicas.

### Referencias Bibliográficas

- Arévalo, J. M., Rincón, M. A. (2016). Análisis sedimentológico del miembro Calcáreo en el Abanico Aluvial de Bucaramanga (sección Rio de Oro-Girón). Universidad Industrial de Santander
- Boinet, T., Bourgois, J., Mendoza, H., & Vargas, R. (1989). La falla de Bucaramanga (Colombia), Su función durante la orogenia andina. *Geología Norandina*, 11, 3-10.
- Bueno, E., & Solarte, A. (1994). Geología, Geotecnia y Comportamiento Erosivo del Área de Reserva Forestal de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander
- Carrillo, E., & Vergara S. H. (2002). Neotectónica Y Fallas Activas Del Nororiente Colombiano. INGEOMINAS
- Clavijo, J., & Vargas, G. (2017). Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga (barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, José María Córdoba, Villa Helena, Villa Rosa, Villa María). Universidad Industrial de Santander
- De Porta, J. (1959). La Terraza de Bucaramanga. *Boletín De Geología*, (3), 5–13. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/4000>
- Diederix, H., Torres, E., Hernández, C., & Botero, P. (2008). Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosimológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga (Inédito). Servicio Geológico Colombiano (INGEOMINAS)
- Diederix, H., Hernández, C., Toro, E. M. T., Naranjo, J. A. O., & Botero, P. (2009). Resultados preliminares del primer estudio paleosismológico a lo largo de la falla de Bucaramanga, Colombia. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 9(2), 18-23

- Diederix, H., Bohórquez, O.P., Mora, H., Peláez, J.R., Cardona, L., Corchuelo, Y., Ramírez, J. & Díaz, F. (2020). Quaternary activity of the Bucaramanga Fault in the Departments of Santander and Cesar. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.13>
- Franco, M. A., & Ramírez, A. M. (2018). Reconstrucción Paleoambiental de los Miembros Órganos, Finos y Gravoso de la Formación Bucaramanga en el Área Metropolitana de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander
- Galán, D. A., & Mora, K. F. (2019). Modelo Estructural Preliminar para el Área de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander
- García, A., & Quintero, H. (2019). Análisis del sistema de fallas Bucaramanga - Suarez y sus implicaciones en la sedimentación del grupo girón. Universidad Industrial de Santander
- Garnica A. F., & Niño 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. Universidad Industrial de Santander
- Hubach, E. (1952). Interpretación Geológica de la erosión y de los deslizamientos en Bucaramanga y medidas de defensa. Servicio Geológico Nacional
- Osorio, J. A., Hernández, C., Torres, E., & Botero, P. (2008). Modelo geodinámico del Macizo de Santander. Informe interno Subdirección de Geología Básica. INGEOMINAS, 113.
- INGEOMINAS, 1997. Microzonificación sísmica del área metropolitana de Bucaramanga, Santander, Colombia, Fase I. Informe preparado para la GOBERNACIÓN DE SANTANDER, Bucaramanga, 75p
- INGEOMINAS. (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. INGEOMINAS

INGEOMINAS. (2010). Interpretación geológica e Hidrogeológica del centro de Santander.

INGEOMINAS

Jiménez, G., Speranza, F., Faccenna, C., Bayona, G., & Mora, A. (2015). Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial fan: Evidence for  $a \leq 3$  mm/yr slip rate for the Bucaramanga-Santa Marta Fault, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 57, 12-22. <https://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.). *Boletín De Geología*, (1), 7-43 <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/3994>

Julivert, M. (1963). Nuevas observaciones sobre la estratigrafía y tectónica del Cuaternario de los alrededores de Bucaramanga. *Boletín De Geología*, (15), 41-59 <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/5771>

Lima, M. C., & Medina, J. D. (2015). Evolución Climática Registrada y Estratigrafía del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander

Navas G., J. (1962). Geología del Carbonífero al N. de Bucaramanga. *Boletín De Geología*, (11), 23-34. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/5690>

Niño, A., & Vargas, G. (1992). Geología y geotecnia de la escarpa noroccidental de la meseta de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander

Page, W. D. (1986). Seismic geology and seismicity of northwestern Colombia. woodward-clyde consultants

París, G., & Romero, J. A. (1994). Fallas activas en Colombia. *Boletín geológico*, 34(2-3), 4-25.

París, G., Machette, M.N., Dart, R.L., Haller, K.M., 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. A project of International Lithosphere

- Program Task Group II-2, Major Active Faults of the World. USGS. Scale 1:2'500.000. USGS Open-File Report 00-0284, 60 p.
- Rossello, E., Orozco, L.A., Pomposiello, C., Favetto, A., y Osorio, J., 2011. Análisis morfoestructural comparativo de los megafallamientos neógenos Valle Fértil (Argentina) y Santa Marta – Bucaramanga (Colombia). XVIII Congreso Geológico Argentino. Neuquén.
- Solano 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. Universidad Industrial de Santander
- Struth, L., Giachetta, E., Willett, S. D., Owen, L. A., & Tesón, E. (2020). Quaternary drainage network reorganization in the Colombian Eastern Cordillera plateau. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(8), 1789-1804.
- Taboada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., y Rivera, C. 2000. Geodynamics of the northern Andes: Subductions and Intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, Vol. 19 (5): 787-813.
- Ujueta, G., 2003. La Falla de Santa Marta-Bucaramanga no es una sola falla; son dos fallas diferentes: la Falla de Santa Marta y la Falla de Bucaramanga. *Geología Colombiana*, 28: 133-153.
- Velandia, F. (2017). Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander-énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga. Universidad Nacional de Colombia
- Velandia, F.; García-Delgado, H.; Zuluaga, C.A.; López, J.A.; Bermúdez, M.A.; Audemard, F.A. (2020). Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The

interaction of the Northern Andes. *Journal of Structural Geology*, 137.

<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104087>

## Apéndices

Apéndice A. Tabla de datos de campo

Estación	X	Y	Z	Azimut	Buzamiento	Estratigrafía	Estrías
ECT1	1100168	1270580	748	60	74		
				38	31		
				182	9		
				187	65		47°NW
				141	49		58°NW
				172	38		62°NW
				228	30		
ECT2	1100162	1270512	752	153	8		
				142	15		
				158	11		
				43	12		
				171	25		
				190	54		
ECT3	1100191	1270505	750	93	64		
				204	58		
				32	64		
ECT4	1100230	1270476	753	229	51		
				143	19		
				230	63		
				172	52		
				55	53		
				58	51		
				46	61		
				173	55		
				52	56		
ECT5	1099461	1272577	776	328	17		
				15	13		
ECT6	1099549	1272708	772	233	76		12°NW
				226	78		17°NW
				265	66		20°NW
ECT7	1099477	1272752	775	218	48	43/33	
				48	36		
				35	40		
ECT8	1103223	1273897	852	72	88		

				216	85		
				81	68		
				278	45		
ECT9	1103572	1273926	860	274	41	278/16	28°NE
				263	31	305/13	30°NE
				298	39		23°SE
ECT10	1098572	1275059	830	62	42	279/44	
				202	70		
				323	87		
				272	70		
				79	18		
				95	58		
				307	83		
ECT11	1098647	1274955	845	91	21		
				135	85		
				59	86		
ECT12	1098668	1274867	849	25	83		45°NE
				38	53		35°NE
				128	46		
				58	25		
				97	70		
ECT13	1098527	1276653	1016	80	76	243/59	20° SW
				77	73	256/61	24°SW
				86	72		
				74	70		
ECT14	1098431	1276427	1005	64	86	313/71	
				78	67		
ECT15	1098607	1274727	867	138	81	35/17	30°SE
				166	68		33°SE
ECT16	1098564	1274801	892	41	37	309/225	60°NE
				35	41		57°NE
				31	40		
				158	69		
				202	39		
				199	61		
ECT17	1098656	1274680	870	117	48	54/51	
				37	37		
ECT18	1102322	1281484	658	273	80	170/19	
				260	87	168/22	
				318	56	262/8	

				309	81	257/11	
ECT19	1102436	1281505	667	261	74		
				258	87		
				272	83		
				254	87		
ECT20	1102458	1281862	657	243	84	161/19	10°SW
				105	86		15°NW
				122	71		8°NW
ECT21	1104040	1283474	689	231	56	174/31	
				219	87	124/23	
				212	85		
				254	81		
ECT22	1104056	1283424	700	197	78		
				295	67		
				316	81		
ECT23	1104276	1282959	727	72	67		
ECT24	1104860	1283831	683	248	90	56/36	
				295	64	86/31	
				184	81		
ECT25	1104875	1283879	687	165	67	52/36	
				40	70		
				156	57		
				337	57		
				343	54		
				43	65		
				327	73		
				297	44		
				220	88		
				10	70		
ECT26	1104888	1283918	693	211	83	317/36	
				151	70	332/40	
				302	78	340/50	
				337	62		
				328	65		
				119	70		
				341	57		
				311	52		
				238	89		
ECT27	1104811	1284033	705	187	76	24/40	
				237	85	may-39	

				24	57	
				85	70	
ECT26	1103961	1285846	775	118	73	
				128	83	
				206	77	
ECT27	1103969	1286025	746	193	54	
				205	57	
				196	46	
				343	75	
ECT28	1103935	1285713	781	348	58	
				340	88	
ECT29	1103832	1285656	806	113	81	52°SE
				107	78	48°SE
				115	76	35°SE
ECT30	1103716	1285699	798	326	85	
				275	79	
ECT31	1103766	1285650	812	145	54	
				265	61	
				316	41	
				297	47	
ECT32	1103502	1285614	846	337	79	70/38
				358	72	
				104	80	
				111	87	
ECT33	1102839	1272909	732	73	82	
				78	86	
ECT34	1103015	1272975	735	42	51	
				99	53	
				258	87	
ECT35	1101974	1271895	783	282	34	
				287	30	
ECT36	1101977	1272056	751	243	46	
				223	51	
ECT37	1102020	1272625	717	45	88	
				302	32	
				42	76	
ECT38	1102054	1272657	718	156	37	
				180	18	
ECT39	1105305	1273015	769	302	87	
				296	72	

ECT40	1102416	1282201	635	78	65		
				67	74		
ECT41	1104256	1273198	758	310	56		
ECT42	1104133	1273314	760	319	81		
ECT43	1103717	1273334	763	295	74		
ECT44	1098945	1273038	794	271	87		
ECT45	1103960	1275649	782	299	83		
ECT46	1103760	1275558	772	264	87		
ECT47	1103214	1275340	759	233	84		
ECT48	1101760	1275435	737	115	86		
ECT49	1101776	1275458	742	142	71		
ECT50	1104953	1285330	824	221	46		