

Análisis del estilo estructural de la Falla de Suratá, Macizo de Santander

Erick Dayan Laguado Acosta

Trabajo de grado para optar al título de geólogo

Director

Francisco Alberto Velandia Patiño

Geólogo, Doctor en Geociencias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mis padres, mis hermanas y toda la familia Laguado Acosta.

Agradecimientos

Agradezco primero que todo a Dios por darme la oportunidad de estar aquí, y quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi papá Fernando Laguado, más conocido como “Tuto”. Él fue la primera persona en tomar la iniciativa de acompañarme en el trabajo de campo, levantándose día tras día, a pesar de saber que esto podría afectar su salud debido a las múltiples lesiones que adquirió durante su tiempo como soldado profesional. Además, prestó su moto, aunque terminó completamente dañada; nunca me dejó enfrentar las dificultades geológicas sin su apoyo y me brindó su experiencia para recorrer el terreno y evitar los inconvenientes de explorar en una zona difícil.

En la Universidad Industrial de Santander, quiero agradecer al profesor Francisco Velandia por la dirección y financiamiento de mi tesis. Su paciencia para resolver mis dudas, sus sugerencias y correcciones en todas las etapas del proyecto, así como su instrucción en el manejo de software y sus puntos de vista en la discusión de la geología regional del Macizo de Santander, fueron invaluable. También, quiero expresar mi agradecimiento a mis compañeros, Daniel Pulido y Mauricio Sánchez, por su apoyo en las campañas de campo y a los profesores Angélica Álvarez y Giovanni Jiménez, a quienes agradezco por sus sugerencias en la revisión del documento.

Un agradecimiento especial a mi mamá, Belly Acosta, por madrugar todos los días para tener listos los insumos alimenticios necesarios y por su constante preocupación como madre y esposa. Quiero agradecer sinceramente a mis hermanas, Yulitza Laguado y Yibeth Laguado, y a mi amigo Kevin Sanabria por su invaluable apoyo. Finalmente, quiero expresar mi gratitud a Slendy Galván. A pesar del poco tiempo que la conozco, se ha convertido en una persona de vital importancia para mí debido a su cariño y apoyo sincero. A todos los que me ayudaron, mil gracias.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	10
2. Objetivos	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. Marco tectónico y geológico	13
3.1 Estratigrafía	13
3.2 Tectónica y geología estructural regional	15
4. Metodología	19
4.1 Cartografía	19
4.1.1 Cartografía geológica	19
4.1.2 Geología estructural	21
4.2 Adquisición de los datos	21
4.2.1 Pliegues	21
4.2.2 Diaclasas y venas	22
4.2.3 Indicadores cinemáticos	23
4.3 Procesamiento de los datos	26
4.3.1 Orientación de fallas geológicas y drenajes	26
4.3.2 Eje de los pliegues	26
4.3.3 Análisis espacial de diaclasas y venas	26
4.3.4 Obtención de tensores de esfuerzo	27

5. Resultados	29
5.1 Estaciones de campo	29
5.2 Cartografía geológica y descripción de las estructuras principales	31
5.3 Cartografía morfoestructural.....	33
5.4 Análisis de orientaciones	36
5.4.1 Fallas geológicas	36
5.4.2 Drenajes	39
5.5 Análisis de tensores de esfuerzo	39
5.5.1 Distribución de los tensores de esfuerzo.....	39
5.5.2 Regímenes de esfuerzo	43
5.5.3 Temporalidad	44
5.6 Análisis de diaclasas	49
5.7 Análisis de venas.....	50
6. Discusión.....	52
6.1 Estilo estructural de la Falla de Suratá y su relación con la geología regional.....	52
6.2 Evolución	54
6.3 Aplicación a recursos del subsuelo y amenazas geológicas	57
7. Conclusiones	59
8. Recomendaciones	61
Referencias bibliográficas.....	62

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio	12
Figura 2. Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio.....	16
Figura 3. Zona de deformación y estructuras mayores	20
Figura 4. Pliegues de segundo orden	22
Figura 5. Metodología de medición de planos de diaclasas y venas	23
Figura 6. Estructuras de tipo Riedel y PT.....	24
Figura 7. Indicadores cinemáticos de la zona de estudio.....	25
Figura 8. Mapa de estaciones de la zona de estudio	30
Figura 9. Mapa geológico del área de estudio	34
Figura 10. Cortes geológicos de la zona de estudio.....	35
Figura 11. Fotografías panorámicas de la Falla de Suratá.....	37
Figura 12. Mapa morfoestructural de la Falla de Suratá.....	38
Figura 13. Mapa de orientación de fallas geológicas.....	40
Figura 14. Mapa de orientación de drenajes	41
Figura 15. Resultado de los tensores de esfuerzo	44
Figura 16. Mapa de tensores de esfuerzo de las secciones de estudio.....	47
Figura 17. Tensor actual y paleotensor de la Falla de Suratá	48
Figura 18. Mapa de la orientación de diaclasas y venas en el área de estudio	51
Figura 19. Evolución de los tensores de esfuerzo en la zona de estudio	57

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser visualizados en el repositorio de la biblioteca.

Apéndice A. Mapa geológico de la zona de estudio

Apéndice B. Mapa morfoestructural del área

Resumen

Título: Análisis del estilo estructural de la Falla de Suratá, Macizo de Santander

Autor: Erick Dayan Laguado Acosta

Palabras Clave: Indicadores cinemáticos, Tensores de esfuerzos, Transpresión, Morfoestructuras

Descripción: La Falla de Suratá, con cinemática dextral, se expone en una región estratégica para comprender la deformación a lo largo de las fallas transversales del Macizo de Santander. A través de un enfoque que combina el mapeo geológico, la cartografía morfoestructural, y el análisis de tensores de esfuerzos derivados de planos estriados, se presenta un modelo estructural de la falla. En total, se obtuvieron 14 tensores de esfuerzos en 36 estaciones de campo a lo largo del corredor de la falla, los cuales reflejan un tensor regional en dirección W-E. Se identifican también tensores locales, subparalelos a las estructuras mayores. Basados en estos resultados y en una revisión bibliográfica exhaustiva, se postula que la Falla de Suratá experimentó una reactivación como estructura regional. Durante el Mesozoico, su cinemática era de tipo normal debido a los procesos distensivos propios de esa era, como lo sugiere el paleotensor aproximado N-S. Sin embargo, el tensor regional W-E, con un SHmax orientado en azimut cercano a 89° , define la Falla de Suratá como transpresiva al sur de la zona de estudio, con un patrón lenticular constituido por fallas tipo Riedel y morfoestructuras asociadas, aunque también se pueden observar geoformas de carácter transtensivo al norte del área. Además, el estudio proporciona una explicación para los movimientos de remoción en masa que afectan principalmente la infraestructura vial de la zona. También se sugiere la dirección potencial de las diaclasas y venas que actúan como conductos para el transporte de fluidos, desde agua subterránea hasta recursos minerales. Este trabajo contribuye a la comprensión del estilo estructural de la Falla de Suratá, subrayando su importancia como parte de la deformación en el Macizo de Santander.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño. Doctor en Geociencias.

Abstract

Title: Analysis of the structural style of the Suratá Fault, Santander Massif

Author: Erick Dayan Laguado Acosta

Key Words: Kinematic indicators, Stress tensors, Transpression, Morphostructures

Description: The Suratá Fault, with dextral kinematics, is exposed in a strategic region to understand the deformation along the transverse faults of the Santander Massif. Through an approach that combines geological mapping, morphostructural cartography, and the analysis of stress tensors derived from striated planes, a structural model of the fault is presented. In total, 14 stress tensors were obtained at 36 field stations along the fault corridor, which reflect a regional tensor in the W-E direction. Local tensors are also identified, subparallel to the larger structures. Based on these results and an exhaustive literature review, it is postulated that the Suratá Fault experienced a reactivation as a regional structure. During the Mesozoic, its kinematics were normal due to the distensional processes typical of that era, as suggested by the approximate paleotensor N-S. However, the W-E regional tensor, with an SHmax oriented in azimuth close to 89°, defines the Suratá Fault as transpressive to the south of the study area, with a lenticular pattern consisting of Riedel-type faults and associated morphostructures, although it is also possible to observe transtensive geofoms to the north of the area. Furthermore, the study provides an explanation for the mass removal movements that mainly affect the road infrastructure in the area. The potential direction of joints and veins that act as conduits for the transport of fluids, from groundwater to mineral resources, is also suggested. This work contributes to the understanding of the structural style of the Suratá Fault, highlighting its importance as part of the deformation in the Santander Massif.

* Degree Work

* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño. Ph.D. in Geosciences.

Introducción

La Falla de Suratá es una de las estructuras transversales con rumbo NE de mayor extensión y expresión geológica al occidente del Macizo de Santander. Su trazo sigue el curso del río Suratá, el cual fluye en dirección SW en áreas correspondientes a los municipios de Cachirí, Suratá, Matanza y Bucaramanga, en los departamentos de Santander y Norte de Santander (Figura 1). La estructura se encuentra en una zona caracterizada por cambios abruptos de elevación, con altitudes que varían desde 1.000 m.s.n.m. en Bucaramanga a 2.645 m.s.n.m. en la Laguna del Alto de Cachirí.

La cuenca hidrográfica del río Suratá ha sido recientemente estudiada en términos de geomorfología tectónica. Se han reportado valores de índices del Factor de Asimetría (AF) de 0,37 y del Factor de Simetría Transversal Topográfica (T) de 0,4 en dirección 239 de azimut de rumbo y una tasa de levantamiento superior a 0,08 m/ka, lo que indica una fuerte asimetría en dirección NE debido al basculamiento activo relacionado con la Falla de Suratá (Moreno, 2021).

Durante su evolución geológica, la falla ha definido geformas estructurales e indicadores de deformación que permiten determinar cambios de cinemática y deducir tensores de esfuerzo a lo largo del tiempo geológico. El área es clave para el análisis estructural de la falla, no solo por su actividad neotectónica, sino también por la presencia de rocas del basamento ígneo-metamórfico y rocas sedimentarias triásicas, jurásicas y cretácicas del Macizo de Santander. La cartografía geológica de los cuadrángulos H12 (Ward et al., 1977b), H13 (Ward et al., 1977a) y la plancha 98 Durania (Fuquen et al., 2010) incluye estudios sobre las características generales de la falla, y se puede observar que su trazo varía a lo largo de la zona, mostrando trazos cóncavos, sinuosos y rectos en la misma estructura, además de una inclinación vertical en corte geológico.

Sin embargo, el tema estructural no ha sido abordado en profundidad y es escasa la información geológica sobre su cinemática, vergencia, evolución y relación con estructuras mayores y menores. Se requiere una descripción y análisis más detallado del estilo estructural de la Falla de Suratá, así como aclarar su confusa nomenclatura.

En lo que respecta a la deformación frágil, frágil-dúctil y dúctil de la Falla de Suratá, se necesitan más datos de campo que respalden posibles variaciones en su cinemática, aprovechando las diferencias reológicas de las rocas afectadas y los datos de indicadores cinemáticos a diferentes profundidades. Los estudios que se han realizado hasta ahora, a través de datos estructurales, explican de manera general la historia de su comportamiento pre y post-cretáceo (Julivert & Téllez, 1963; Kammer, 1993). Dada la incertidumbre de los modelos regionales y la escasez de datos disponibles, se propone como metodología de trabajo el análisis de tensores de esfuerzo para dar soporte al planteamiento de una discusión sobre la temporalidad de la falla, relacionando su actividad con los estudios de paleomagnetismo y termocronología realizados en las zonas más cercanas. Comprender el estilo estructural de la Falla de Suratá es el punto de partida para entender el comportamiento de otras fallas transversales con rumbo NE que afectan el Macizo de Santander, así como sus potenciales implicaciones en la amenaza sísmica y de remoción en masa, o en el tránsito de fluidos, desde aguas que se infiltran en el sistema subterráneo hasta las posibles mineralizaciones provenientes de cuerpos profundos.

Los parámetros cartográficos existentes a lo largo de la Falla de Suratá no están claramente definidos, a pesar de los rasgos morfoestructurales que presenta. La posible ramificación hacia el sur, su terminación en el norte, el ancho de su zona de daño y el sistema de fallas menores asociadas son parámetros que pueden determinar su estilo estructural. Por esta razón, se plantea recopilar y aportar nueva información sobre la deformación relacionada con la falla, a través del análisis

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar un análisis estructural de la Falla de Suratá y su contexto regional en el Macizo de Santander a partir de cartografía geológica e indicadores cinemáticos.

2.2 Objetivos específicos

Identificar y caracterizar las morfoestructuras relacionadas a la Falla de Suratá con ayuda de modelos digitales de elevación y datos en campo.

Realizar control y detalle de la cartografía geológica en un área de los municipios de Matanza y Suratá a escala 1:50.000.

Determinar el tensor local de esfuerzos a través del análisis mesoestructural y el tratamiento de los indicadores cinemáticos en el área de estudio.

Obtener un modelo del subsuelo y deformación a lo largo de la Falla de Suratá por medio de cortes geológicos transversales.

Plantear elementos de discusión sobre el contexto regional de la Falla de Suratá y su interacción con la Falla de Bucaramanga y otras estructuras del Macizo de Santander.

3. Marco tectónico y geológico

3.1 Estratigrafía

La zona de estudio está compuesta por algunas de las unidades litoestratigráficas que aparecen los cuadrángulos H12 (Ward et al., 1977b), H13 (Ward et al., 1977a) y la plancha 98 Durania (Fuquen et al., 2010), abarcando la mayoría de las unidades aflorantes en el Macizo de

Santander (Figura 2). Su basamento está principalmente constituido por rocas metamórficas del Neoproterozoico (Neis de Bucaramanga) y del Ordovícico temprano (Esquistos del Silgará y Ortoneis), representando eventos de metamorfismo relacionados con las orogenias Grenvilliana y Famatiniana (Cordani et al., 2005; Mantilla-Figueroa et al., 2016; van der Lelij et al., 2016). Estas rocas metamórficas están intruidas por granitoides del final del Triásico y principios del Jurásico, entre los cuales destaca la Tonalita, Granodiorita y Cuarzomonzonita de la Corcova, siendo esta última el cuerpo intrusivo más grande. Las rocas cristalinas se encuentran parcialmente cubiertas, en discordancia estratigráfica, por rocas sedimentarias del Paleozoico y principio del Triásico, como la Fm. Diamante y Fm. Tiburón (Ward et al., 1977a, b).

Durante el Triásico y el Jurásico, la región experimentó una tectónica extensiva a lo largo de lo que hoy es la Cordillera Oriental, formando estructuras tipo graben, acompañadas por sedimentación continental sintectónica, evidenciada en la Fm. Bocas, Fm. Jordán y en discordancia la Fm. Girón. La presencia de estas rocas es esencial debido a su espesor variable y a que se encuentra en contacto inferior discordante con el basamento ígneo-metamórfico o con rocas sedimentarias del Paleozoico-Triásico (Cooper et al., 1995; Velandia et al., 2020).

Las rocas sedimentarias marinas a transicionales del Cretácico que afloran en el Macizo de Santander cubren las unidades mencionadas anteriormente. En la zona de estudio aparece el intervalo formacional Los Santos-Umir (Berriasinao hasta finales del Maastrichtiano) que se encuentra en la paleocuenca del Valle Medio del Magdalena (Ward et al., 1977a, b). Cabe resaltar que las unidades sedimentarias del Cretácico aflorantes en la plancha 98 Durania (Fuquen et al., 2010), pertenecen a la Cuenca del Catatumbo y para evitar problemas de nomenclatura en una misma cartografía, se prefirió usar los nombres de las unidades de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena debido a que son las que abarcan la mayor parte del área. Aunque no existe registro

estratigráfico en la zona de estudio perteneciente al Paleógeno y Neógeno, los eventos de la Orogenia Andina se encuentran evidenciados en la Falla de Suratá, la cual deforma fuertemente las sucesiones sedimentarias del flanco occidental del Macizo de Santander y las pone en contacto fallado con el basamento cristalino (Patarroyo-Camargo et al., 2021). Los depósitos actuales se encuentran en su mayoría a lo largo de los ríos principales (depósitos y abanicos aluviales, coluviones y depósitos glaciares) (Ward et al., 1977a, b).

3.2 Tectónica y geología estructural regional

El Macizo de Santander se ubica al norte de la Cordillera Oriental y forma parte del Bloque de Maracaibo, que muestra una tendencia de escape hacia el N-NE debido a estructuras regionales como la Falla de Boconó (con cinemática dextral) y el Sistema de Fallas de Bucaramanga-Santa Marta (con cinemática sinistral) (Audemard & Audemard; 2002). En este proyecto de investigación, se utiliza la distinción hecha por Ujueta (2003) respecto a las diferencias de cinemática, desplazamientos y estilos de deformación de estas dos fallas, y se prefiere el término “Falla de Bucaramanga” para referirse a la estructura sinistral que se encuentra en el borde occidental del Macizo de Santander (Ward et al., 1977a, b; Velandia, 2017; Velandia et al., 2020).

El Macizo de Santander está delimitado al oriente por las fallas Río Servitá - Mutiscua y La Mercedes, al sur por la Falla de Soapaga, y al occidente por la Falla de Lebrija (Velandia, 2017) o Los Santos. Velandia et al. (2020) sugieren que este macizo experimenta una cinemática combinada en su interior, representada por el modelo estructural tipo “dominó” o “estante de libros”, influenciado por la cizalla sinistral de las estructuras longitudinales mayores (Falla de Bucaramanga y subparalelas) y por los movimientos dextrales de sus fallas secundarias o internas en dominó (con rumbo NE), en las que destaca la Falla de Suratá (Figura 3).

Figura 2

Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio

Edad		ULE	Nomenclatura	Litología	Descripción	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Aluviones y Coluviones	Q2al, Q2c, Q2aa	Depósitos aluviales, coluviales y abanicos aluviales.	
		Pleistoceno	Terrazas y Depósitos Glaciáricos	Q1tf, Q1g	Terrazas, conos de deyección y depósitos glaciares.	
	Neógeno	Plioceno				
		Mioceno				
	Paleógeno	Oligoceno				
		Eoceno				
Paleoceno						
Mesozoico	Cretácico Superior	Maastrichtiano	Fm. Umir	K2u	Lodolitas grises oscuras a grises verdosas con concreciones ferruginosas y mantos de carbón. Espesor: 1.000-1.400 m.	
		Campaniano				
	Cretácico Inferior	Santoniano	Fm. La Luna	K2l		Alternancia de calizas fosilíferas y lodolitas calcáreas de color negro y hacia el tope de la unidad chert azul-negro y fosforitas. Espesor: 280-630 m.
		Coniaciano				
		Turoniano				
	Cretácico Inferior	Cenomaniano	Fm. Simití	K1K2s		Lodolitas calcáreas de color gris oscuro y niveles delgados intercalados de calizas grises y areniscas. Espesor: 250-650 m.
		Albiano	Fm. Tablazo	K1t		Alternancia de calizas, lodolitas y areniscas. Espesor: 150-325 m.
		Aptiano				
		Barremiano	Fm. Paja	K1p		Capas delgadas de lodolitas negras con intercalaciones de areniscas y calizas fosilíferas. Espesor: 125-625 m.
		Hauteriviense	Fm. Rosa Blanca	K1r		Intercalaciones de calizas fosilíferas y lodolitas grises oscuras. Espesor: 290-450 m.
		Valanginiense	Fm. Los Santos	K1ls		Areniscas cuarzosas, localmente conglomeráticas y lodolitas pardo rojizas. Espesor: 218 m.
		Berriasiense				
	Jurásico	Superior	Fm. Girón	J2J3g		Alternancia de areniscas ligeramente conglomeráticas y limolitas pardo rojizas. Espesor: 4650 m.
		Medio				
Inferior		Fm. Jordán	Cuarzo-monzonita de la Corcova	J1j	T3J1cl	Alternancia de areniscas y limolitas. Espesor: 300-660 m.
Triásico	Superior	Fm. Bocas		T3b	Areniscas y lodolitas con capas delgadas de roca volcánica. Espesor: 590 m.	
	Medio	Fm. Tiburón	PTt		Conglomerados con fragmentos de calizas grises tamaño guijarro. Espesor: 450-500 m.	
	Inferior					
Paleozoico	Pérmico	Fm. Diamante	CPd		Intercalación de calizas grises y lodolitas grises a pardo rojizas. Espesor: 550 m.	
	Carbonífero					
	Devónico					
	Silúrico					
	Ordovícico	Ortoneises de Berlín	Esquistos del Silgará	O1b	O1s	Ortoneises de protolito cuarzo-monzonítico. Esquistos, filitas y cuarcitas de bajo grado metamórfico.
	Cámbrico					
Proterozoico	Neoproterozoico	Neis de Bucaramanga	Npb		Neises pelíticos y máficos, cuarcitas granatíferas y sillimaníticas, anfibolitas, mármoles y migmatitas.	

Nota. La columna muestra las unidades litoestratigráficas (ULE) aflorantes en la zona de estudio.

Información tomada de Ward et al. (1973) y Royero & Clavijo (2001).

Algunos estudios indican que existe compresión y transcurrencia en la Cordillera Oriental debido a la deformación interna causada por el movimiento sinistral de la Falla de Bucaramanga, evidenciado en sus características morfológicas (Kammer, 1999; Taboada et al., 2000; Cediel et al., 2003, Jiménez et al., 2015). Otros autores relacionan esta compresión con el modelo de “indentor” de Pamplona, propuesto por primera vez por Boinet et al. (1985), que describe una gran estructura con vergencia hacia el W, imbricándose gradualmente hacia el E del Macizo de Santander. Además, Osorio et al. (2008) proponen un modelo estructural para el Macizo de Santander basado en bloques homogéneos con deformación local a lo largo de las fallas con orientación NNW, mientras que la Falla Boconó se interpreta como una estructura influyente en el macizo a lo largo de una "Zona de Transición Transversal", que podría haber afectado la geometría de la Falla Bucaramanga.

Velandia et al. (2020) redefinen estos modelos para dar lugar a la “Cuña de Pamplona”, un orógeno resultado de la convergencia entre el los Andes de Mérida y el Macizo de Santander, en el cual predominan el tensor de esfuerzos W-E y fallas inversas con vergencia hacia el W en el frente de deformación de Pamplona (Figura 3), cuya compresión genera un estilo de piel delgada en dirección a la cuenca de los Llanos Orientales (Arauca), a lo largo de retrocabalgamientos de vergencia E. En las zonas laterales de la cuña, definidas por la Falla de Boconó (falla dextral) y Falla de Chitagá (falla sinistral), se presentan fallas subparelalas con cinemática similar. Además, se atribuye a la convergencia de estas zonas transversales el levantamiento del sector de Vetas en forma de pop-up.

La continuación de la zona transversal de Boconó hasta Bucaramanga corresponde a la Falla de Suratá (Figura 3). Esta estructura fue estudiada y nombrada por primera vez por Julivert (1959) y presenta un rumbo predominante de N20E a lo largo del río Suratá; se trata de una falla

de rumbo dextral con alto ángulo de inclinación (Royero & Clavijo, 2001; Mejía et al., 2017). Según Julivert & Téllez (1963), esta falla tiene historia de movimientos precretácicos de distensión y postcretácicos de tipo compresivo, los primeros en donde el bloque occidental se hunde y los últimos relacionados con la Orogenia Andina. Los estudios de paleomagnetismo realizados en la Falla de Suratá indican una rotación en sentido horario en la fábrica magnética de la Fm. Jordán y Fm. Girón, la cual está relacionada con la reactivación de esta falla normal antigua como una falla de rumbo dextral (Jiménez et al., 2022). Sin embargo, su componente vertical se encuentra en discusión actualmente debido a que no se ha logrado determinar si es normal (Kammer, 1993; Velandia, 2017; Amaya et al., 2017; Siravo et al., 2019), inversa (Julivert, 1959; Julivert & Téllez, 1963; Royero & Clavijo, 2001) o si presenta distinta cinemática por sectores. En términos generales, esta falla pone en contacto rocas sedimentarias triásicas, jurásicas y cretácicas en su bloque oriental con el basamento ígneo-metamórfico en su bloque occidental (Ward et al., 1973; García-Ramírez et al., 2019; Patarroyo et al., 2021).

La Falla de Suratá hace parte de la geometría de fallas estilo dominó limitada por la Falla de Bucaramanga al sur y la Falla de Guamalito al norte (Velandia, 2017; Velandia et al., 2020). Esta estructura muestra una cinemática de contracción oblicua asociada a eventos de exhumación (García-Delgado et al., 2019). Mediante el método de huellas de fisión en circones, se han reportado edades de enfriamiento que oscilan entre 37-38 Ma (van der Lelij et al., 2016; Amaya, 2016) para la granodiorita ubicada al occidente de la Falla de Suratá. Esto sugiere que la exhumación del Macizo de Santander a lo largo de esta estructura podría haber estado activa desde hace aproximadamente 40 Ma, y posiblemente se relaciona en términos temporales con la actividad a lo largo de la Falla de Bucaramanga en la misma región (Amaya, 2016). Geomorfológicamente, la Falla de Suratá exhibe evidencias tanto de deformación frágil como

dúctil, entre las cuales destacan sillas de falla, facetas triangulares, lomos de presión y plegamientos a lo largo de la vía Matanza-Suratá (Osorio et al., 2008). Además, está relacionada con las mineralizaciones de los intrusivos de composición granítica y cuarzomonzonítica en los distritos mineros aledaños (Mantilla-Figueroa et al., 2011). En la figura 3, se puede observar la relación de la Falla de Suratá con otras estructuras en el Macizo de Santander.

4. Metodología

4.1 Cartografía

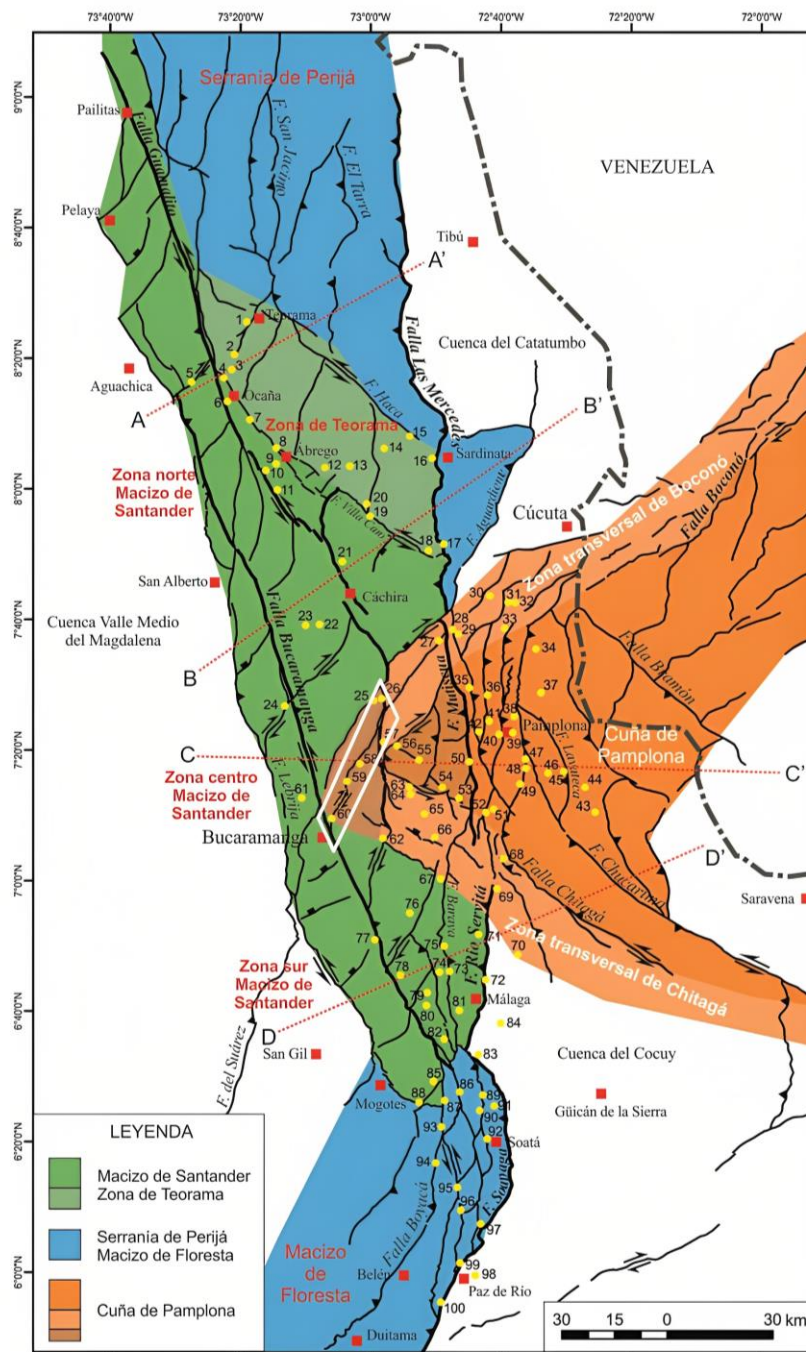
4.1.1 Cartografía geológica

El mapeo de las unidades aflorantes en la zona de estudio fue llevado a cabo inicialmente en un entorno GIS, a través de la interpretación de las imágenes satelitales de Google Earth y los Modelos Digitales de Elevación ALPSRP268850120 y ALPSRP268850130, con resolución de 30 m. Estos modelos fueron obtenidos de la página web de Alaska Satellite Facility, pertenecientes al instituto de Geofísica de la Universidad de Alaska Fairbanks, por medio del satélite ALOS PALSAR.

El análisis se soportó en los mapas geológicos regionales a escala 1:100.000, incluyendo los cuadrángulos H12 (Ward et al., 1977b), H13 (Ward et al., 1977a) y la plancha 98 Durania (Fuquen et al., 2010). La cartografía detallada de las unidades litoestratigráficas se realizó mediante la utilización de mapas de sombras y de pendientes derivados del DEM.

Figura 3

Zona de deformación y estructuras mayores



Nota. El mapa muestra la interacción de la Falla de Suratá con el Macizo de Santander y la Cuña de Pamplona. Tomado de Velandia (2017).

Esta metodología permitió llevar a cabo la revisión cartográfica, generar mapas preliminares que se ajustan a los “estándares de cartografía geológica digital para planchas a escala 1:100.000 y mapas departamentales” establecidos por el Servicio Geológico Colombiano (SINGEO, 2012), y facilitar la identificación de rocas de basamento y sedimentarias competentes e incompetentes. Toda esta información fotogeológica fue corroborada en el trabajo de campo.

4.1.2 Geología estructural

El estudio de las estructuras de la zona se hizo con los insumos mencionados anteriormente, los cuales permitieron definir la continuidad del trazo de las fallas mayores y menores e identificar las morfoestructuras relacionadas con su cinemática, tales como facetas triangulares, cuencas *pull-apart*, lomos de presión y obturación, sillars de falla, lagunas de falla y pliegues asociados (Keller & Pinter; 1999; Fossen, 2010).

La cinemática de estas estructuras se verificó en el trabajo de campo mediante transectas. Además, se recopilaron datos de indicadores cinemáticos para llevar a cabo el análisis de tensores de esfuerzo y se realizaron varios cortes geológicos perpendiculares a las estructuras principales presentes en el área, dibujados por medio del software CorelDraw, con el fin de mejorar la descripción e interpretación del subsuelo y su deformación.

4.2 Adquisición de los datos

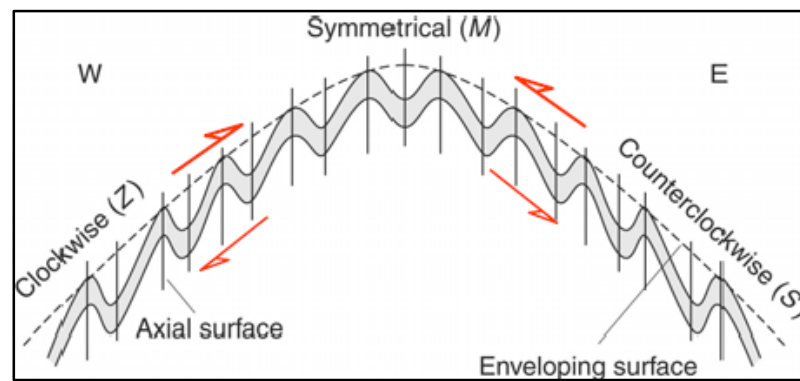
4.2.1 Pliegues

La información recopilada en campo sobre pliegues se realizó principalmente con la medición de planos de estratificación, foliación y clivaje en los dos flancos, con el fin de determinar la orientación de la línea de charnela/eje axial en el procesamiento de datos, esto debido a que en la mayoría de los casos no se encuentra expuesta de forma tridimensional. En los pliegues cilíndricos, la línea de charnela y el eje del pliegue tienen la misma orientación, por lo cual se

siguió la metodología de Babín & Gómez (2010) a través de la medición del *trend* y *plunge* sobre el plano axial del pliegue o como línea de intersección de los flancos. La cinemática y vergencia exhibida por los pliegues se determinó usando la relación con los pliegues parásitos (o de segundo orden) en forma de S y/o Z, según los criterios de Van der Pluijm & Marshak (2004) (Figura 4).

Figura 4

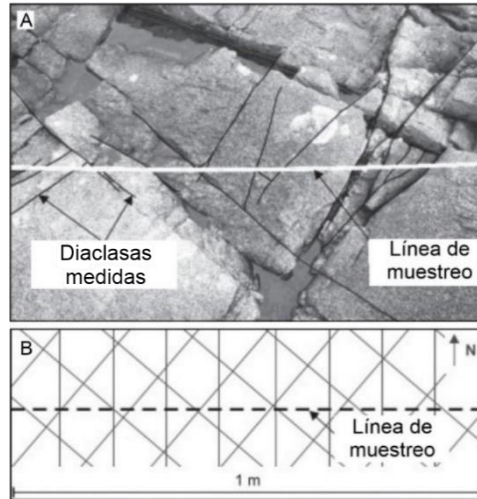
Pliegues de segundo orden



Nota. Relación entre los pliegues de segundo orden y el clivaje en la vergencia. Adaptado de Van der Pluijm & Marshak (2004).

4.2.2 Diaclasas y venas

Los datos de diaclasas y venas fueron recopilados mediante la medición de rumbo y buzamiento de manera sistemática a lo largo de líneas de muestreo en cada afloramiento, con el objetivo de reducir el sesgo en la adquisición de la información (Figura 5). Para llevar a cabo la línea de muestreo o "scanline" se colocó una cinta en el afloramiento para crear una línea de referencia. Esta línea se orientó para representar mejor los conjuntos de diaclasas y venas presentes (Priest & Hudson, 1981; Priest, 1993; Watkins et al., 2015). En el caso de identificar fracturas claramente abiertas, se realizó una descripción de la composición de su relleno con el fin de mejorar la calidad de los diagramas de rosa.

Figura 5*Metodología de medición de planos de diaclasas y venas*

Nota. (A) Línea de escaneo a lo largo de un afloramiento. (B) Como funciona el “scanline” en teoría. Adaptado de Watkins et al. (2015).

4.2.3 Indicadores cinemáticos

Siguiendo la metodología planteada por Velandia (2017), se dio prioridad a la recopilación de medidas de indicadores cinemáticos. Estos datos abordaron detalles relativos a la orientación de los planos de falla, incluyendo el azimut de buzamiento e inclinación del plano, junto con el pitch (y su dirección) en las lineaciones de estrías. Además, se tomó en consideración el sentido del movimiento siguiendo los criterios establecidos por Doblas (1998) y Petit (1987) (Figura 6), junto con la incorporación de un parámetro de confianza según la calidad de los afloramientos y de los indicadores cinemáticos (Velandia, 2017).

Se identificaron diversos indicadores, como escalones, venas en zonas de cizalla, estructuras de tipo Riedel, así como fibras de crecimiento de minerales como calcita y cuarzo, además de pliegues de segundo orden (Figura 7). Se examinaron con detenimiento ciertas características particulares de los planos para obtener información adicional que respaldara los

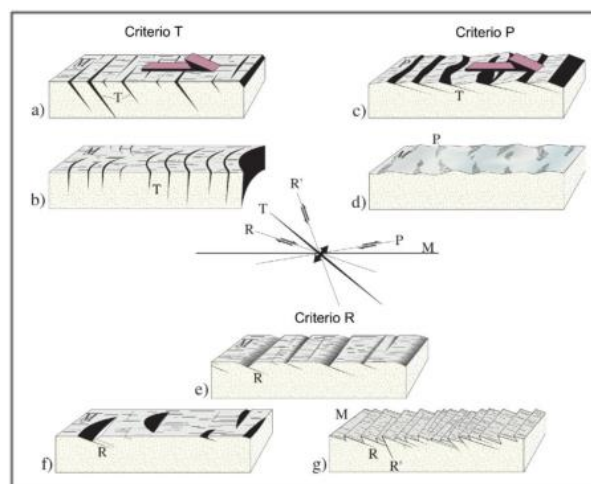
pasos futuros relacionados con la normalización de los datos no procesados (definición de paleotensores), en línea con las recomendaciones planteadas por Sperner & Zweigel (2010), Hippolyte et al. (2012) y Simon (2019).

Velandia (2017) subraya la importancia de reconocer las limitaciones inherentes al método, el cual se fundamentó en criterios subjetivos. Esto implicó la necesidad de recolectar información que permitiera evaluar la calidad de los datos, considerando aspectos tales como: (i) el grado de meteorización de los afloramientos, (ii) la litología (ya que, en rocas con foliación, la lineación de las estrías podría ser poco confiable al confundirse con la fábrica original de la roca), (iii) la preservación y claridad de las estrías, (iv) la cantidad y calidad de los indicadores cinemáticos, así como (v) las relaciones de corte entre los planos.

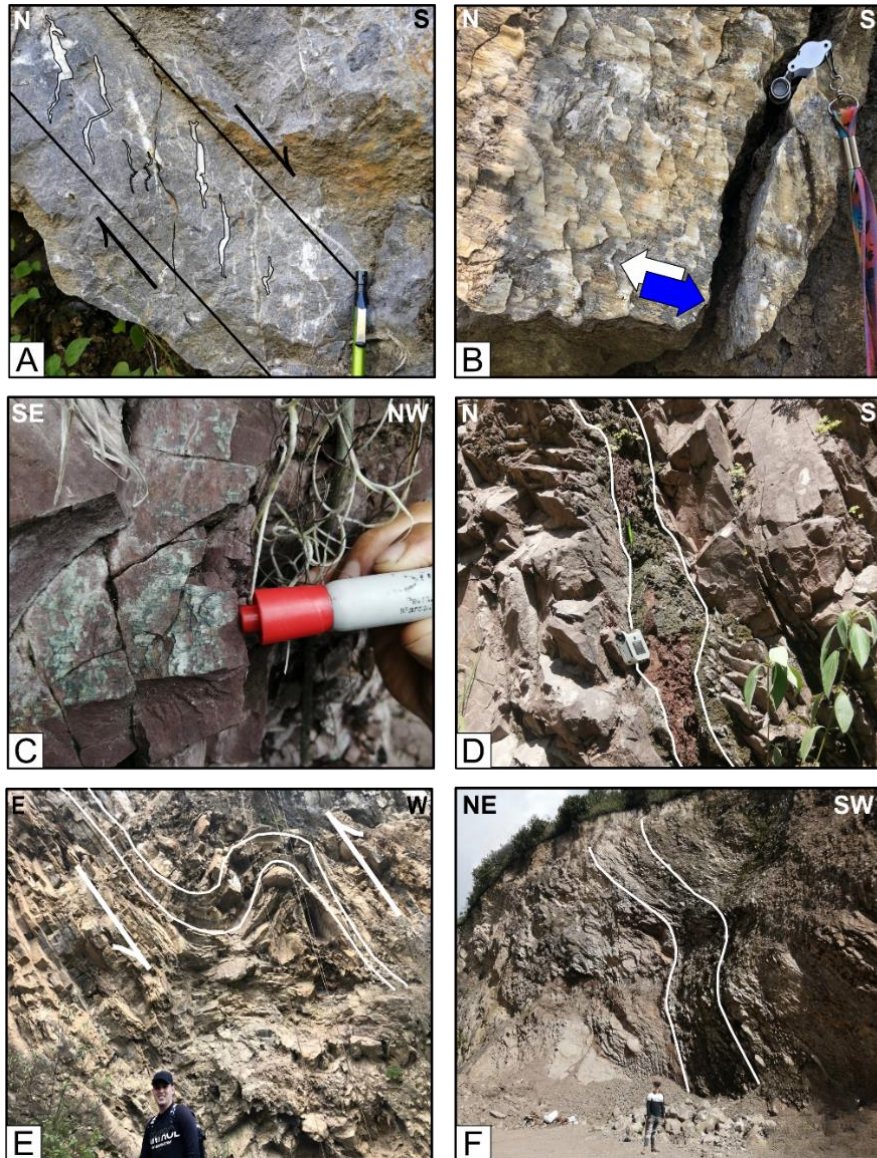
Teniendo en cuenta estos factores, se asignó un nivel de calidad a cada dato medido en el afloramiento, variando entre confianza baja, confiable y segura.

Figura 6

Estructuras de tipo Riedel y PT



Nota. Indicadores cinemáticos y criterios para determinar el movimiento relativo de los bloques en un plano de falla. Adaptado de Petit (1987) en Fossen (2010).

Figura 7*Indicadores cinemáticos de la zona de estudio*

Nota. (A) Venas sigmoidales de calcita con cizalla dextral en la Fm. Rosa Blanca. (B) Escalones de falla en calizas de la Fm. Rosa Blanca. (C) Planos estriados de falla en la Fm. Jordán. (D) Brecha de falla inconsolidada en areniscas de la Fm. Jordán. (E) Pliegues de segundo orden en forma de S en el flanco derecho del anticlinal en la Fm. La Luna. (F) Pliegues de gravedad en la Fm. La Luna.

4.3 Procesamiento de los datos

4.3.1 Orientación de fallas geológicas y drenajes

Se identificaron las principales orientaciones de las fallas y drenajes en la zona de estudio para luego graficar las direcciones preferenciales mediante el uso FracPaQ. Éste es un software de código abierto disponible en MATLAB™ (Healy et al., 2017), diseñado para la caracterización y análisis de sistemas de fracturas en rocas y minerales. Las orientaciones preferenciales de los drenajes y las estructuras principales a nivel regional se determinaron a través del diagrama de rosa proporcionado por el software, aplicando un tratamiento con peso para cuantificar todos los trazos, resaltando especialmente los más largos. Por otro lado, las posibles direcciones de flujo se derivaron utilizando el diagrama de conectividad de nodos y el gráfico ternario de conectividad de trazos de Manzocchi (2002).

4.3.2 Eje de los pliegues

Los ejes de los pliegues se representan en el mapa geológico a una escala de 1:50.000 tomando en consideración las unidades aflorantes y las variaciones de los datos de estratificación recopilados durante el trabajo de campo, así como aquellos que estaban registrados en los estudios previos realizados en la zona por Julivert (1959), Ward et al. (1977a, b) y Kammer (1993). Algunos de estos pliegues fueron modelados en los cortes geológicos realizados.

4.3.3 Análisis espacial de diaclasas y venas

El tratamiento de los datos estructurales de diaclasas y venas se llevó a cabo mediante diagramas de rosa usando el software GeoRose (Yong Technology Inc, 2014). Estas proyecciones permitieron observar la dirección de rumbo preferencial de los planos, lo cual fue importante para determinar las relaciones genéticas con las estructuras mayores y menores involucradas en la obtención de tensores de esfuerzo (Forero-Ortega et al., 2020). La construcción de estos diagramas

requiere más de 200 datos de fracturas para que sea representativo. Por otro lado, los diagramas de densidad de polos se generaron a través del software Stereonet (Allmendinger et al., 2012), en el que se graficaron los polos y se realizó una interpolación utilizando la función 1 % del área de los contornos, lo que facilitó la interpretación de los datos.

4.3.4 Obtención de tensores de esfuerzo

En Velandia (2017), se indica que para el cálculo de un tensor de esfuerzos se requerían al menos cuatro planos de falla con tendencias diferentes, de manera que representaran los cuatro parámetros necesarios: la orientación de los tres ejes principales de esfuerzos (σ_1 , σ_2 y σ_3) y la relación de esfuerzos R ($\sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$) (Etchecopar et al., 1981; Angelier, 1994; Delvaux & Sperner, 2003). Resultó crucial considerar R' , ya que podía correlacionarse con el régimen de esfuerzos según la relación con R de la siguiente manera: extensivo ($R'=R$), de rumbo ($R'=2-R$), o compresivo ($R'=2+R$); o de manera más específica según su valor: extensión radial (σ_1 vertical, $R'=0-0,25$), extensión pura (σ_1 vertical, $R'=0,25-0,75$), transtensión (σ_1 o σ_2 vertical, $R'=0,75-1,25$), rumbo puro (σ_2 vertical, $R'=1,25-1,75$), transpresión (σ_2 o σ_3 vertical, $R'=1,75-2,25$), compresión pura (σ_3 vertical, $R'=2,25-0,75$), o compresión radial (σ_1 vertical, $R'=2,75-3,00$) (Delvaux et al., 1997; Delvaux & Sperner, 2003; Tripathy & Saha, 2013). Los tensores de esfuerzos se representaron como la orientación del esfuerzo horizontal máximo (SHmax), que podía ser σ_1 para regímenes de compresión o rumbo, o σ_2 para regímenes extensivos, o combinaciones de ellos. En este sentido, se empleó el software WinTensor 5.9.2 (Delvaux & Sperner, 2003), que permitía obtener tensores de alta calidad mediante un proceso interactivo de separación de datos.

En el software WinTensor, se usó los métodos de Diedros Rectos Mejorados (I.R.Dihedr) y Optimización Rotacional (R. Optim) para determinar las posibles orientaciones de σ_1 y σ_3 . El

programa también permite verificar los cambios en los tensores de esfuerzos según los planos utilizados y filtrar datos de baja confianza basándose en observaciones de campo o por incompatibilidad mecánica según el círculo de Mohr, además de identificar ubicaciones de planos en el dominio inestable (fallas neoformadas o reactivadas) o en el dominio estable (planos de fractura sin desplazamiento) (Velandia, 2017).

Un tensor de calidad debía cumplir con las siguientes condiciones: (i) mayor cantidad de planos involucrados, (ii) planos ubicados en el campo del círculo de Mohr como neoformados o reactivados, (iii) diferentes direcciones en su orientación (planos de falla con estrías en el hemisferio sur de la proyección estereográfica – proyección Angelier), (iv) coherencia en la orientación de deslizamiento de los planos focales (Tangent lineation – proyección Hoeppener) y (v) histogramas con F5 tendiendo a cero (Velandia, 2017). Además, para clasificar los tensores según el régimen tectónico se usó los diagramas ternarios de Frohlich, en donde los regímenes de rumbo, extensión y compresión se encuentran en los vértices del triángulo, mientras que las soluciones intermedias corresponden a transpresión, transtensión o indefinido (Frohlich, 1992).

Finalmente, el procesamiento de todos los datos de la zona de estudio se realizó sin tener en cuenta el factor de peso, es decir, que los planos estriados se cuantifican por igual sin dar realce a ninguno de ellos. Esto resultó en la generación de varios tensores de esfuerzo, que son representados con flechas y con balones de playa. Cada uno de estos tensores exhibe diversos parámetros, entre los cuales se destacan: la orientación de los ejes de esfuerzos principales, los valores de R , R' , $F5$ y α obtenidos por el R. Optim (Optimización Rotacional), la calidad del tensor (QRt), la orientación del Sigma horizontal máximo o esfuerzo principal (SHmax), el tipo de tensor y el régimen de esfuerzos asociado a éste. Además, se incluye el número de datos

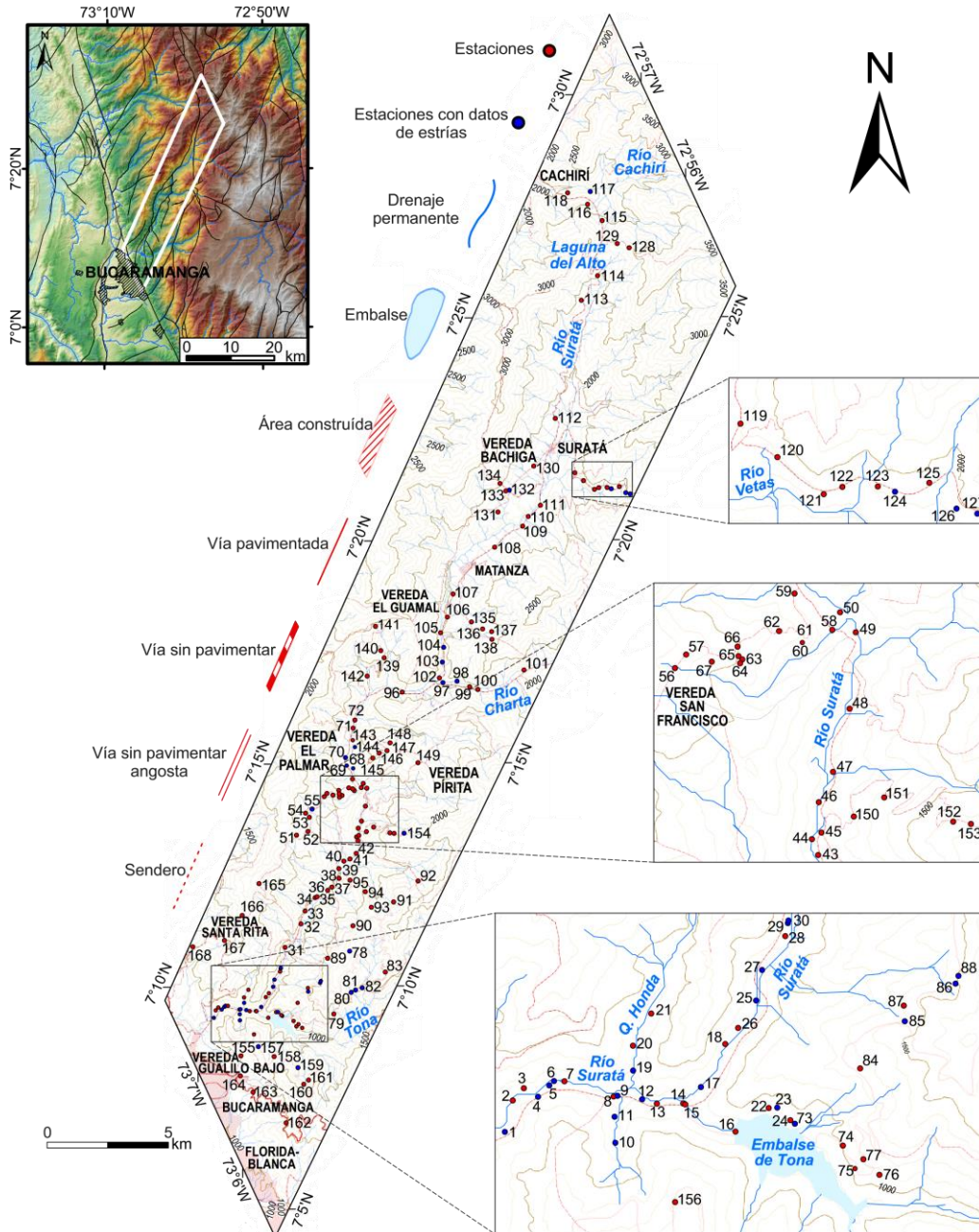
utilizados en la generación de cada tensor (n) derivados de una población del subconjunto (n subset), y el número total de datos (N) involucrados en el análisis (Velandia, 2017).

La determinación de la edad relativa de los tensores de esfuerzo deducidos se basa principalmente en observaciones de campo de las relaciones transversales entre planos de falla, las correlaciones de la cinemática y la tendencia de las fallas con las estructuras mapeadas. No obstante, en ocasiones esto no resulta viable, por lo que es necesario considerar otros aspectos, tales como el análisis del círculo de Mohr, la edad de la roca (donde se medía el indicador cinemático), la calidad, conservación y nitidez del plano de falla estriado, los minerales asociados en el plano y el número de planos con diferentes orientaciones (Velandia, 2017).

5. Resultados

5.1 Estaciones de campo

En la zona de estudio definida para la Falla de Suratá, al occidente del Macizo de Santander, se llevaron a cabo un total de 168 estaciones de campo, en las cuales se midieron datos de estrías (un total de 40 estaciones, de las cuales se procesaron 36), venas, diaclasas y se realizaron observaciones panorámicas (Figura 8). En lo que respecta al control litológico, 88 de las estaciones se encuentran ubicadas en rocas del basamento ígneo-metamórfico, mientras que las otras 80 en rocas sedimentarias, tanto competentes como incompetentes. En cuanto a la edad de las rocas, la mayoría de los datos (57 estaciones) corresponden a sitios en unidades del Neoproterozoico, 39 estaciones están ubicadas en unidades geológicas del Paleozoico, 45 estaciones en rocas del Triásico-Jurásico, tanto ígneas como sedimentarias, 25 estaciones en unidades del Cretácico y tan solo 2 en coluviones del Cuaternario.

Figura 8*Mapa de estaciones de la zona de estudio*

Nota. Mapa topográfico que presenta las estaciones de campo, incluyendo aquellas donde se recopilieron datos de estrías. Además, resalta las principales vías de acceso, drenajes, cuerpos de agua, municipios y veredas de la zona de estudio.

5.2 Cartografía geológica y descripción de las estructuras principales

Mediante el análisis de la cartografía geológica, se logró llevar a cabo un control litológico en las unidades aflorantes e identificar estructuras plegadas y falladas que no se habían registrado previamente en la geología de los cuadrángulos H12 (Ward et al., 1977b), H13 (Ward et al., 1977a) y la plancha 98 Durania (Fuquen et al., 2010) o que apenas se percibían como lineamientos geológicos o fallas inferidas. En el mapa geológico resultante (Figura 9), se establecen los ejes de los pliegues, tomando en consideración las variaciones en los datos de estratificación en los flancos, que se midieron durante el trabajo de campo o se registraron en los mapas de Julivert (1959), Ward et al. (1977a, b) y Kammer (1993).

Además, se definen las fallas que afectan la zona y se identifican sus respectivas cinemáticas, desplazamientos y vergencias. Estas deducciones se derivaron de observaciones en campo, teniendo en cuenta las relaciones y los contactos entre las unidades litoestratigráficas, además de las evidencias plasmadas en los planos estriados y venas. También se consideraron los estudios en geología estructural realizados en Charta (Velandia et al., 2016) y Tona (Bejarano & Navas, 2018) para determinar el estilo de las estructuras.

Las principales fallas geológicas identificadas se muestran en la Figura 9, y sus estilos estructurales se explican mediante cuatro cortes geológicos transversales (Figura 10). En términos generales, la Falla de Suratá es la estructura más representativa de la zona. Tanto esta estructura como la Falla de Pírita exhiben cinemáticas dextrales con componente inverso, vergencias al E y patrones de piel gruesa debido a su influencia en las rocas del basamento ígneo-metamórfico del Macizo de Santander. El nombre de “Falla de Pírita” se refiere a la misma falla que fue denominada “Falla de Matanza” por Julivert & Tellez (1963), sin embargo, en este contexto se evita el uso de dicho nombre debido a que esta estructura corresponde a un *splay* de la Falla de Suratá, y su

denominación anterior puede causar confusión ya que no se extiende a lo largo del municipio de Matanza. En este documento, se propone el nombre de “Falla de Pírita” para referirse a la estructura que cruza la vereda de Pírita, teniendo como límite norte la Falla de Suratá y al sur la Falla de Bucaramanga (Figura 9).

A lo largo de la vía Suratá-California, el estilo estructural de piel gruesa asociada con la Falla de Suratá involucra el basamento metamórfico del Paleozoico (Esquistos del Silgará). Por otro lado, en la región nororiental de la zona de estudio, la Falla El Cerrito exhibe estilo en piel delgada con unos pequeños retrocabalgamientos que levantan la Fm. Los Santos en forma de pop-up. Los pliegues en dirección N-S en esta área son el resultado de los retrocabalgamientos en techos pasivos (con vergencia W) y en abanico imbricado con vergencia W (Figura 10A) que se asocian en profundidad a la Falla de Suratá.

La Falla La Cristalina es otra estructura regional presente y se trata de una falla invertida, reactivada en forma inversa y con componente sinistral. Esta falla, que tiene vergencia hacia el E y muestra un estilo de piel gruesa (Velandia et al., 2016), controla la evolución del abanico imbricado hacia el E, poniendo en contacto el intervalo formacional Girón-Umir en inconformidad estratigráfica con los Esquistos del Silgará. Además, junto a la Falla de Suratá, controla en profundidad la formación del anticlinal que se encuentra en esta parte del área (Figura 10B).

En los perfiles geológicos C-C’ y D-D’ (Figura 10C y 10D), ubicados hacia el sur de la zona, se observa claramente un proceso de transpresión, el cual se muestra en estructuras en flor asimétricas con vergencia principal al E y en pliegues apretados entre la falla de Suratá y Pírita. Además, estas estructuras están asociadas con retrocabalgamientos que dan lugar a pop-ups que facilitan el levantamiento de la Cuarzomonzonita de la Corcova y de las rocas sedimentarias del Triásico-Jurásico.

Las fallas con orientación W-E presentes en la zona reflejan un estilo estructural transtensivo y se asocian con los trazos antitéticos de la Falla de Suratá (debido a su cinemática dextral). Estas fallas controlan el curso de los ríos Vetás y Charta en la zona, así como las quebradas paralelas a esta dirección (Figura 1 y 9).

5.3 Cartografía morfoestructural

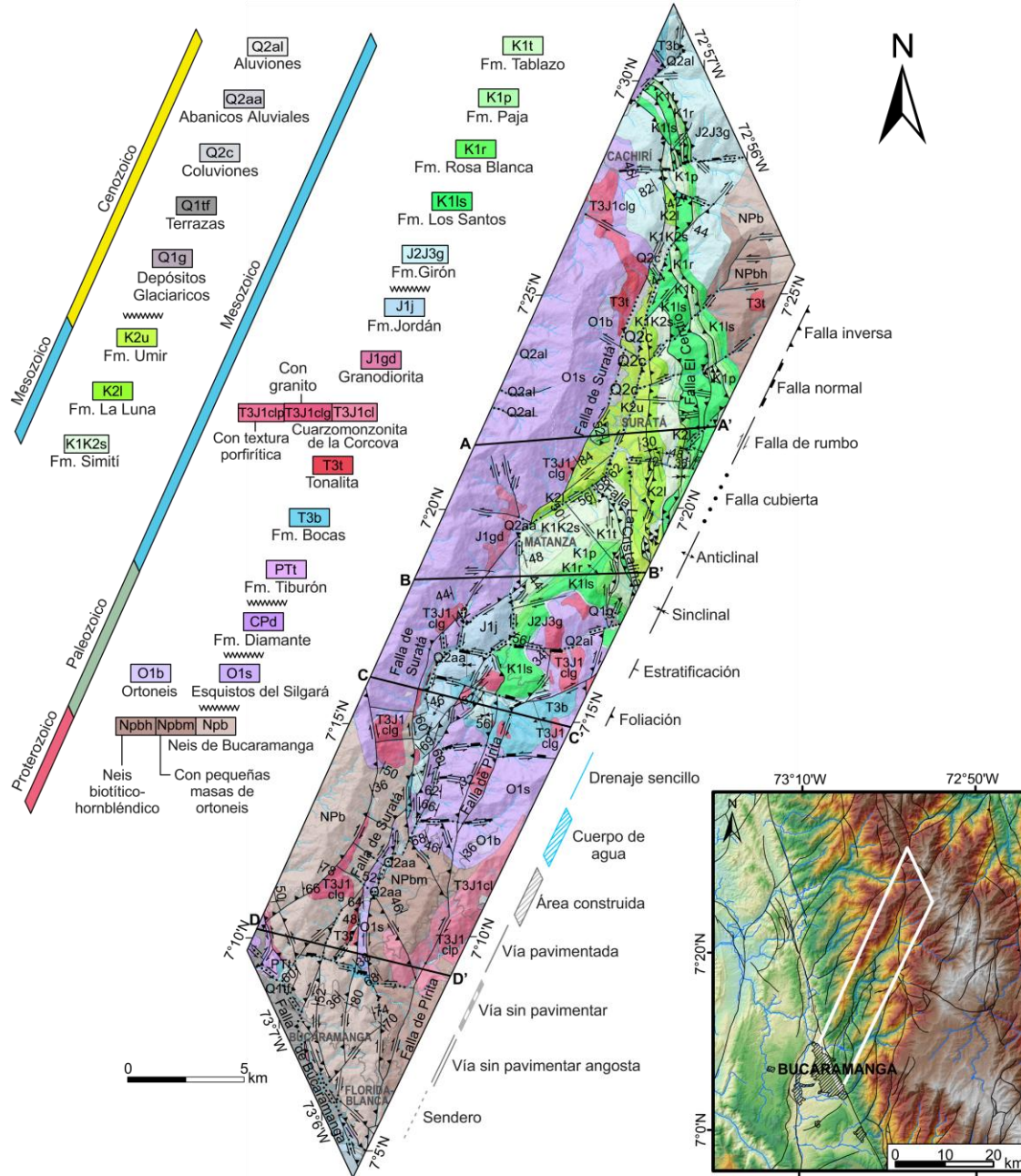
La cartografía morfoestructural de la Falla de Suratá pone de manifiesto el carácter transpresivo regional de esta estructura, especialmente hacia el sector sur. Esto se debe a su cinemática dextral, con su componente vertical inverso. Las rocas afectadas abarcan tanto el basamento ígneo-metamórfico del Macizo de Santander como las rocas sedimentarias del Triásico, Jurásico y Cretácico (Figura 11).

Las condiciones climáticas y uso del suelo del área permiten una cartografía confiable de las morfoestructuras vinculadas a los movimientos de la falla ya que no se presenta una abundante vegetación. Esto se logra mediante el uso de modelos digitales de elevación, imágenes satelitales de Google Earth y trabajo de campo (Figura 12). Entre el embalse de Tona y el municipio de Suratá, destacan las geoformas transpresivas. Estas incluyen lomos de presión generados por los saltos laterales de la falla (Figura 11 y 12), así como lomos de obturación, facetas triangulares, silletas de falla, ganchos de flexión y pliegues oblicuos, características propias de este tipo de falla.

Por otro lado, hacia el sector norte, en la franja Suratá-Cachirí, se observan geoformas de transtensión locales en áreas donde el valle lineal se ensancha. Estas formas se manifiestan como cuencas elongadas que contienen depósitos de coluviones y rocas sedimentarias. Estos elementos podrían relacionarse con zonas de apertura. Además, se ha identificado que la Laguna del Alto de Cachirí corresponde a una laguna de falla ubicada en el bloque yacente de la Falla de Suratá (Figura 12).

Figura 9

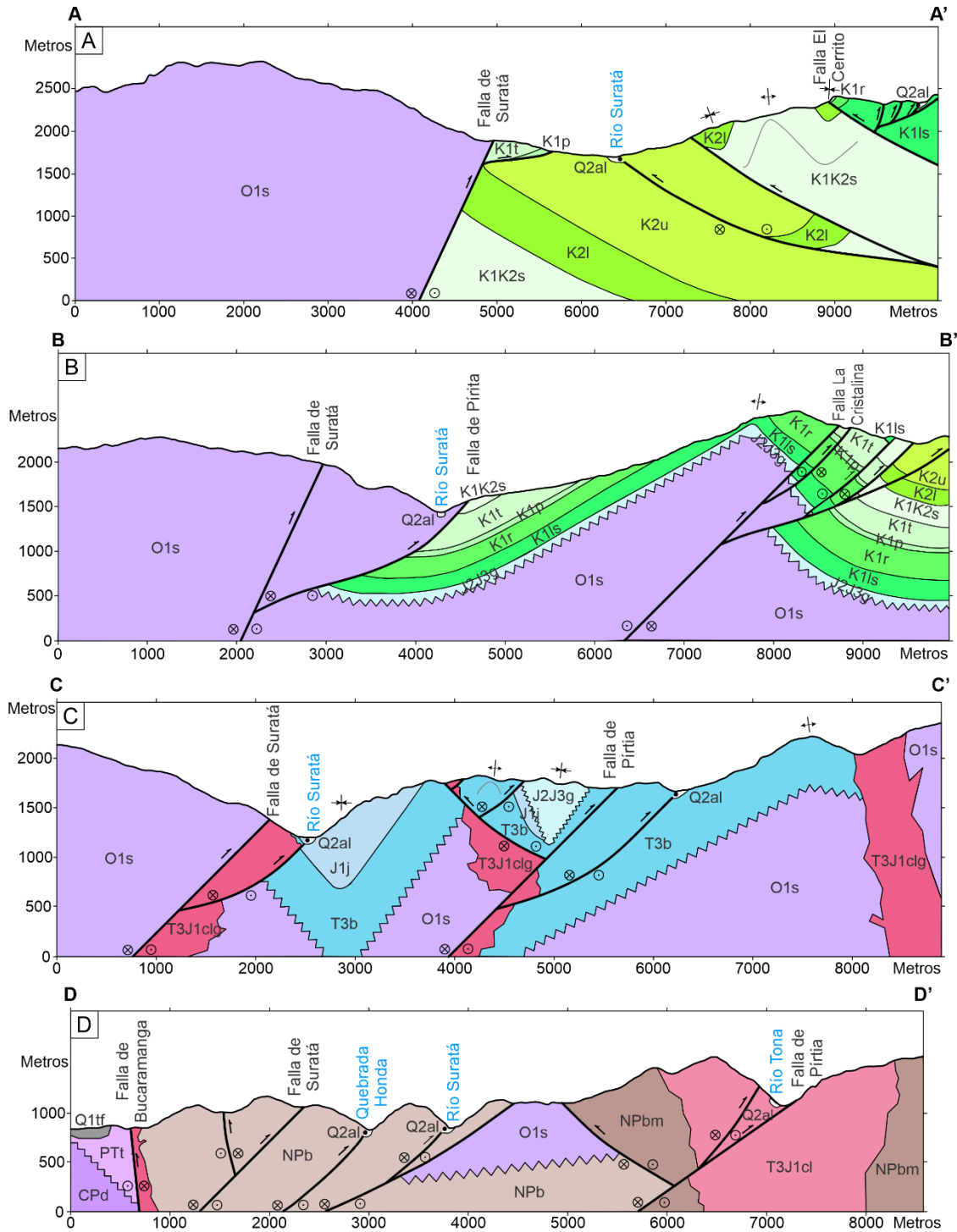
Mapa geológico del área de estudio



Nota. En el mapa se ubica las líneas de corte A-A', B-B', C-C' y D-D' de la Figura 10. Modificado de los mapas geológicos de los cuadrángulos H12 (Ward et al., 1977b), H13 (Ward et al., 1977a) y la plancha 98 Durania (Fuquen et al., 2010).

Figura 10

Cortes geológicos de la zona de estudio



Nota. Los cortes se encuentran localizados en la Figura 9.

Las geoformas transpresivas y transtensivas mencionadas anteriormente, también están asociadas con las estructuras tipo Riedel de la Falla de Suratá. A lo largo del trazo principal de la falla, se distingue una geometría lenticular formada por la interacción de las fallas menores sintéticas (R), antitéticas (R') y post-riedel (P), que también contribuyen a la formación de lomos de presión compuestos de rocas antiguas (Neis de Bucaramanga, los Esquistos del Silgará, la Fm. Bocas y la Fm. Jordán) y depresiones que se observan en los ensanchamientos de los valles de las quebradas y ríos. La configuración geométrica del sistema Riedel, o trazos sintéticos y antitéticos, confirma la cinemática de rumbo dextral de la Falla de Suratá.

5.4 Análisis de orientaciones

A través de la aplicación de FracPaQ, se realizó un análisis a nivel regional sobre las orientaciones de los sistemas de drenaje y las fallas geológicas presentes en la zona de estudio (Figura 13 y 14). Este análisis se llevó a cabo siguiendo la metodología previamente descrita, con el propósito de establecer la posible conexión entre dichas orientaciones y el estilo estructural característico de la Falla de Suratá, así como su influencia en el flujo de fluidos en el área.

5.4.1 Fallas geológicas

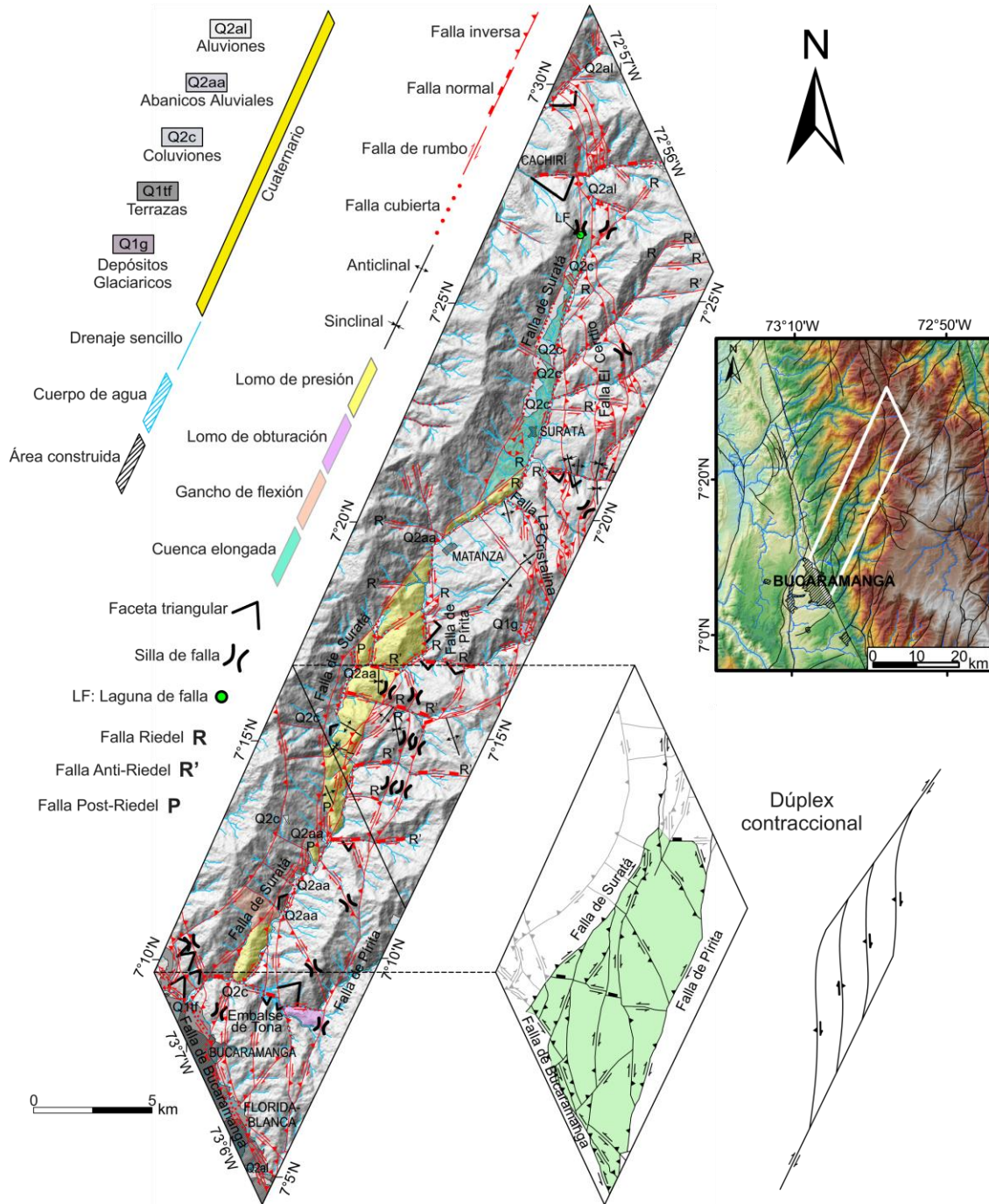
El diagrama de rosa obtenido a través de FracPaQ revela una marcada tendencia hacia el NE, con notables orientaciones de 10°-20° en azimuth de rumbo. Estas orientaciones coinciden con el trazo principal de la Falla de Suratá y sus estructuras paralelas. Adicionalmente, asociados a su cinemática dextral, se observan preferencias en las orientaciones de sus trazos sintéticos en el rango de 50°-60° y trazos antitéticos en la dirección W-E (Figura 13).

Figura 11*Fotografías panorámicas de la Falla de Suratá*

Nota. Tomadas al sur de la zona de estudio, estas fotografías muestran el trazo y cinemática de las estructuras principales, así como los contactos litológicos de las unidades aflorantes.

Figura 12

Mapa morfoestructural de la Falla de Suratá



Nota. Modelo digital de elevación y mapa de sombras como base para el trazado de estructuras. El mapa muestra el modelo de dúplex contraccional al sur de la zona de estudio.

En este software, también se llevó a cabo un análisis utilizando el diagrama de conectividad de nodos y el gráfico ternario de conectividad de trazos, conforme a la propuesta de Manzocchi (2002). Los resultados indican que estas estructuras exhiben redes de interconexión sólidamente establecidas, ya que mayoritariamente están enlazadas a través de nodos tipo Y. La conexión por línea (CL) se encuentra en el rango de valores entre 2 y 3,57, lo cual confirma la efectiva conectividad de las fallas en cuestión (Figura 13).

5.4.2 Drenajes

Los resultados del diagrama de rosa revelan que la corriente principal tiene una tendencia en dirección NE-SW, la cual coincide con la del río Suratá. Además, se observan dos tendencias adicionales destacadas: una a 60° y la otra a 90°, siendo el río Vetás y el río Charta notables en esta última. Estos hallazgos evidencian el control ejercido por las estructuras sintéticas y antitéticas de la Falla de Suratá en la red de drenaje, respectivamente (Figura 14).

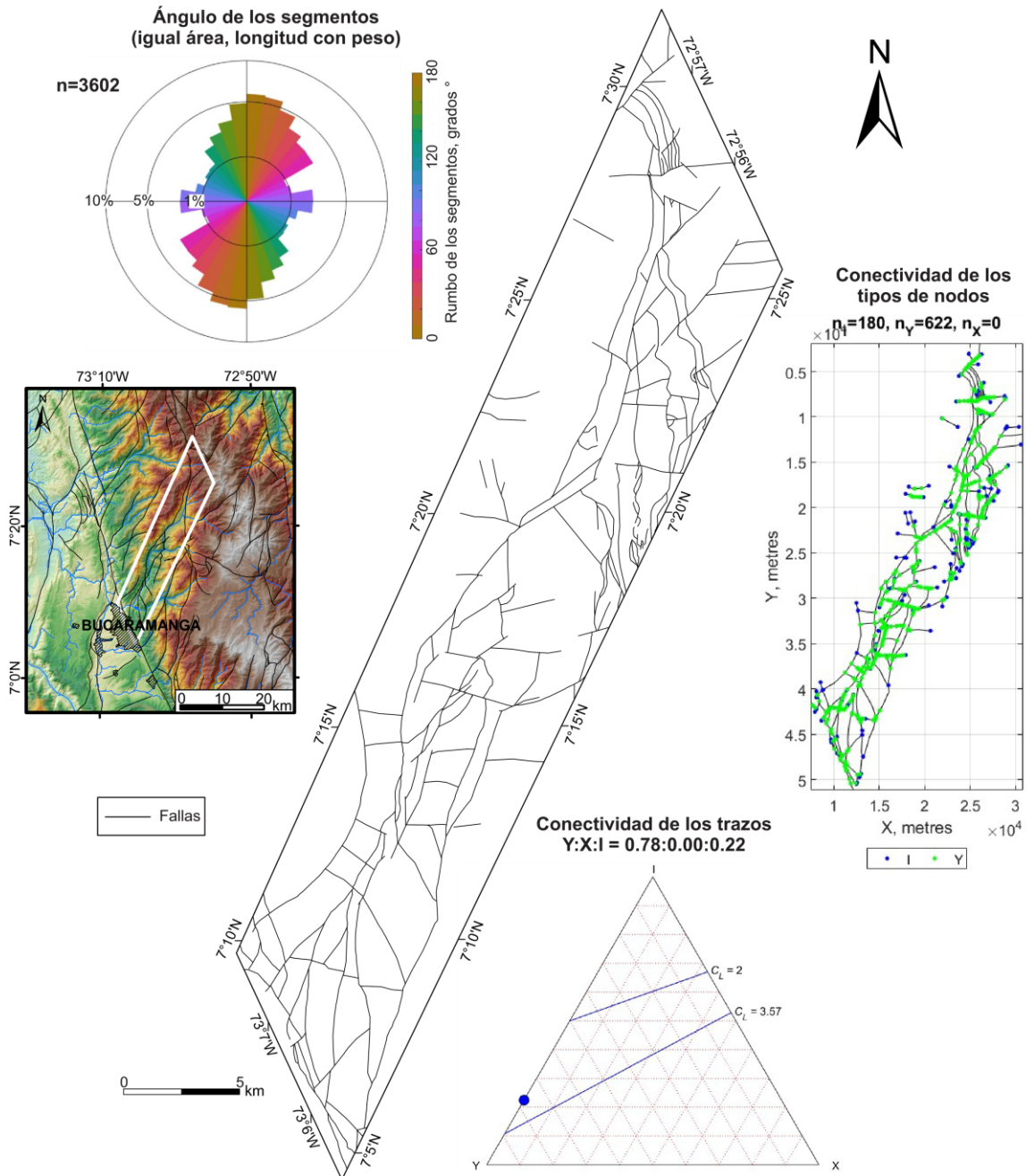
5.5 Análisis de tensores de esfuerzo

5.5.1 Distribución de los tensores de esfuerzo

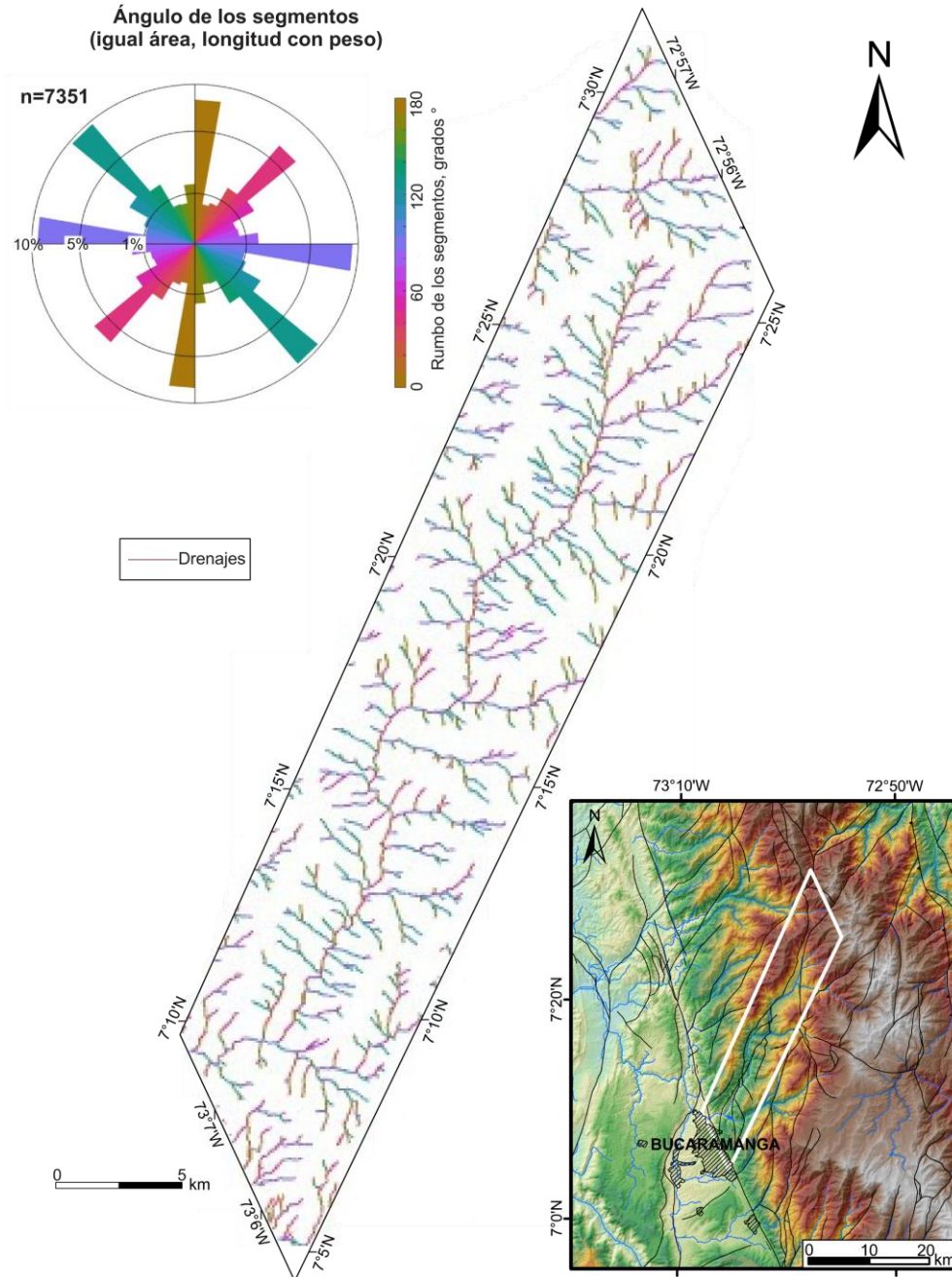
Con el propósito de comprender las variaciones de los tensores en términos de tiempo y espacio, los resultados se organizan y presentan considerando las ubicaciones propuestas por bloques o secciones (Figuras 15 y 16). Esto se hace teniendo en cuenta el bajo número de datos por estación en la mayoría de los casos y porque el análisis por bloques facilita el procesamiento de los datos al agrupar estaciones. Además, la distribución de estos bloques también tiene en cuenta las características morfoestructurales de cada sector. Para garantizar la calidad de los tensores, se trazó el corredor de la Falla de Suratá siguiendo una geometría relacionada con el sistema Riedel y abarcando un ancho de zona de daño que varía entre 5-7 km.

Figura 13

Mapa de orientación de fallas geológicas



Nota. Diagrama de rosa y gráficos de conectividad de trazos y nodos obtenidos en FracPaQ a partir de las fallas geológicas de la zona de estudio.

Figura 14*Mapa de orientación de drenajes*

Nota. Diagrama de rosa obtenido mediante FracPaQ a partir del trazo de los drenajes de la zona de estudio.

A lo largo de este corredor de falla, los límites de las secciones o bloques están definidos por rasgos transversales, que en su mayoría corresponden a los trazos antitéticos de la Falla de Suratá. En total, se presentan seis secciones o bloques: (i) Sección Norte 1 (SN1), que abarca parte del municipio de Cachirí; (ii) Sección Norte 2 (SN2), ubicada en el municipio de Suratá, en la vereda de Bachiga, su límite sur es la falla antitética que se encuentra en el río Vetás; (iii) Sección Centro 1 (SC1), que engloba la vereda El Guamal en el municipio de Matanza, su límite estructural sur es la falla R' que se extiende a lo largo del río Charta; (iv) Sección Centro 2 (SC2), que comprende las veredas El Palmar y San Francisco en el municipio de Matanza, y la vereda Pírita correspondiente al municipio de Charta; (v) Sección Sur 1 (SS1), cuyo límite sur es la falla sinistral que se extiende a lo largo del embalse de Tona y (vi) Sección Sur 2 (SS2), que incluye parte de Bucaramanga, específicamente la vereda Gualilo Bajo, así como Floridablanca.

De las 40 estaciones con datos de estrías, se procesaron 36 de ellas ya que se encontraban dentro del corredor de la Falla de Suratá, quedando fuera las estaciones 1, 82, 126 y 127. El procesamiento de estas 36 estaciones, en las cuales se midieron un total de 159 planos estriados, resultó en 14 tensores con 121 planos, que corresponden al 76% del total de datos después del procesamiento (Figura 15). Al analizar los tensores según la distribución de las estaciones, se puede afirmar que el 36% de los tensores se encuentran en SS1, donde se ubica el 41% de las estaciones; el 29% de los tensores se encuentran en SC2, que alberga aproximadamente el 19% de las estaciones; el 21% de los tensores corresponden a SS2, donde se localiza el 24% de las estaciones; y el 14% restante de los tensores se divide equitativamente entre SN2 y SC1, donde se registran el 5% y 8% de las estaciones, respectivamente. El último 3% de las estaciones se encuentra en SN1, en las cuales no es posible generar un tensor de calidad debido a que sólo

presenta un dato de plano estriado, el cual corresponde a la Falla de Suratá, ya que muestra el mismo rumbo y cinemática dextral.

5.5.2 Regímenes de esfuerzo

Con el objetivo de llevar a cabo un análisis de los regímenes de esfuerzo en la zona de estudio, los tensores obtenidos se relacionaron con las estructuras cartografiadas y se agruparon en cuatro rangos de dirección: N-S ($180^{\circ}\pm 20^{\circ}$), NW-SE (110° - 160°), W-E ($90^{\circ}\pm 20^{\circ}$) y NE-SW (20° - 70°). Estos rangos se subdividieron a su vez en cinco categorías que corresponden a los tres regímenes de esfuerzo principales y dos intermedios: compresión, transpresión, transcurrencia, transtensión y distensión.

El tensor N-S se presenta principalmente en régimen de transcurrencia pura, con predominio en SS1 y en SS2, y en régimen de distensión en SC2; este tensor representa el 21% del total de tensores procesados y no se puede relacionar con los desplazamientos actuales de las estructuras cartografiadas debido a que refleja una cinemática sinistral con componente normal para las estructuras con rumbo NE del área.

El tensor NW-SE se encuentra en cercanía y dispuesto en forma paralela al rumbo de la Falla de Bucaramanga, especialmente en régimen de transcurrencia pura en SS2, y en régimen de distensión en SS1; la distribución porcentual de este tensor es del 14% con respecto al total de tensores obtenidos después del procesamiento.

El tensor W-E se observa en cuatro tensores en toda la zona de estudio, con un predominio relativo de régimen de transcurrencia pura, y un tensor en régimen de compresión en SC2; este tensor corresponde al 36% de todos los tensores, siendo estadísticamente el más evidente. Además, explica la cinemática dextral y el componente inverso de las estructuras con rumbo NE, como es el caso de las fallas de Suratá y Pírita, mientras que en SS2 exhibe a la Falla de Bucaramanga en

sinestral. También se relaciona perpendicularmente con los ejes de los pliegues cartografiados en dirección N-S y NE-SW de las dos secciones centro en la zona de estudio.

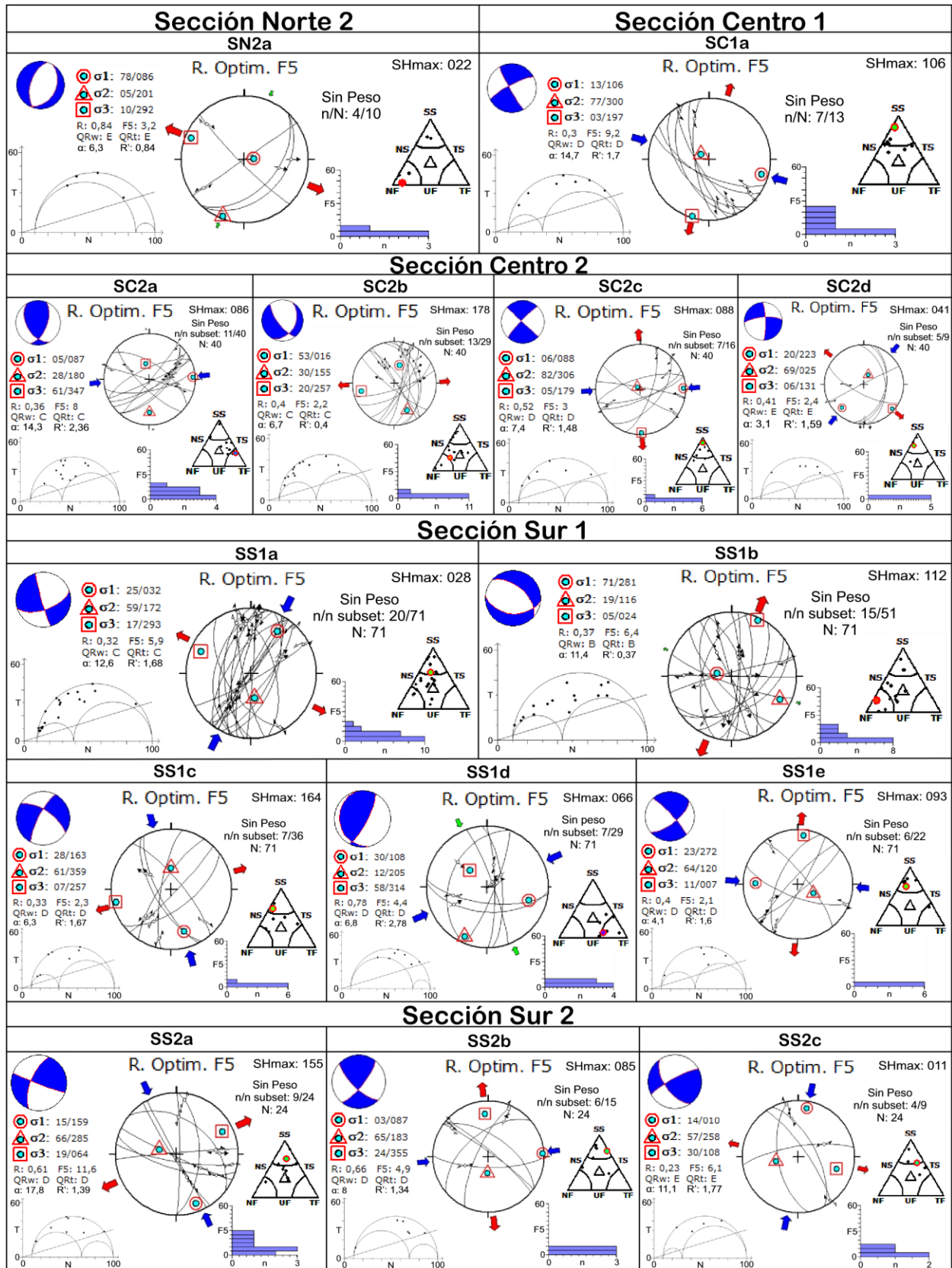
El tensor NE-SW se presenta predominantemente en régimen de transcurrencia pura en dos tensores, uno ubicado en SC2 y otro en SS1, donde se asocia con los desplazamientos dextrales de las estructuras que se encuentra entre las fallas de Suratá y Pírita. También se encuentra en menor proporción en SN2 en régimen de transtensión, donde exhibe una cinemática normal para la falla de Suratá y sus estructuras paralelas, la cual no se relaciona con los desplazamientos registrados en la cartografía geológica (Figura 9), mientras que en SS1 aparece en régimen de compresión; este tensor representa el 29% del total de tensores obtenidos.

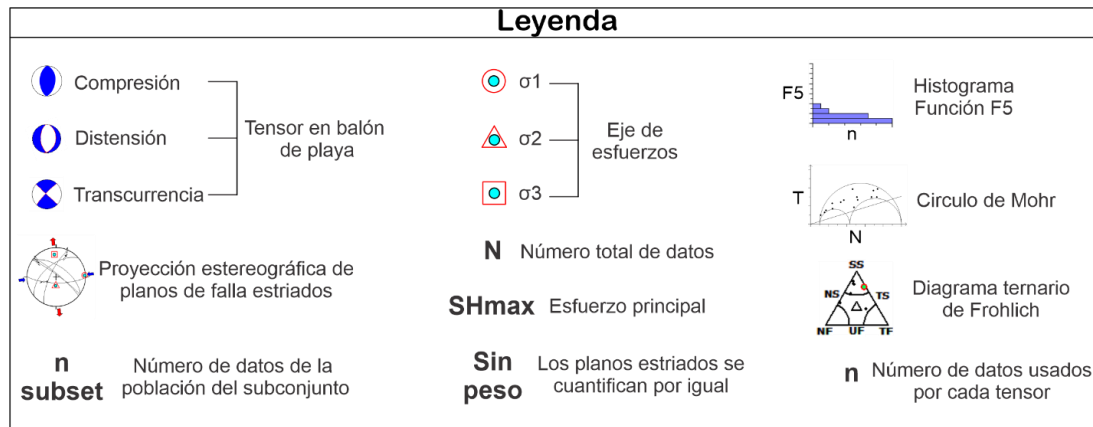
5.5.3 Temporalidad

A partir de las estaciones en las que se midieron planos estriados y los regímenes de esfuerzo descritos anteriormente, se identificaron un total de cinco tensores recientes (Figura 16). De estos, tres corresponden al tensor W-E y están ubicados en las dos secciones centrales, así como en SS1. En esta última sección o bloque, se prefirió este tensor debido a que representa la cinemática actual tanto de la Falla de Suratá como de la Falla de Bucaramanga, a pesar de que el tensor NW-SE presentaba mayor cantidad de planos estriados. Los restantes dos tensores son NE-SW. El primero se encuentra en SS1 en régimen de transcurrencia pura e indica que las estructuras que se encuentran entre las fallas de Suratá y Pírita presentan cinemática dextral. El otro tensor fue identificado en SN2, pero en régimen de distensión. Este último tensor se incluye en la Figura 16 porque es la única solución para la sección o bloque, indicando apertura, pero no refleja la cinemática actual de la Falla de Suratá y sus estructuras paralelas.

Figura 15

Resultado de los tensores de esfuerzo



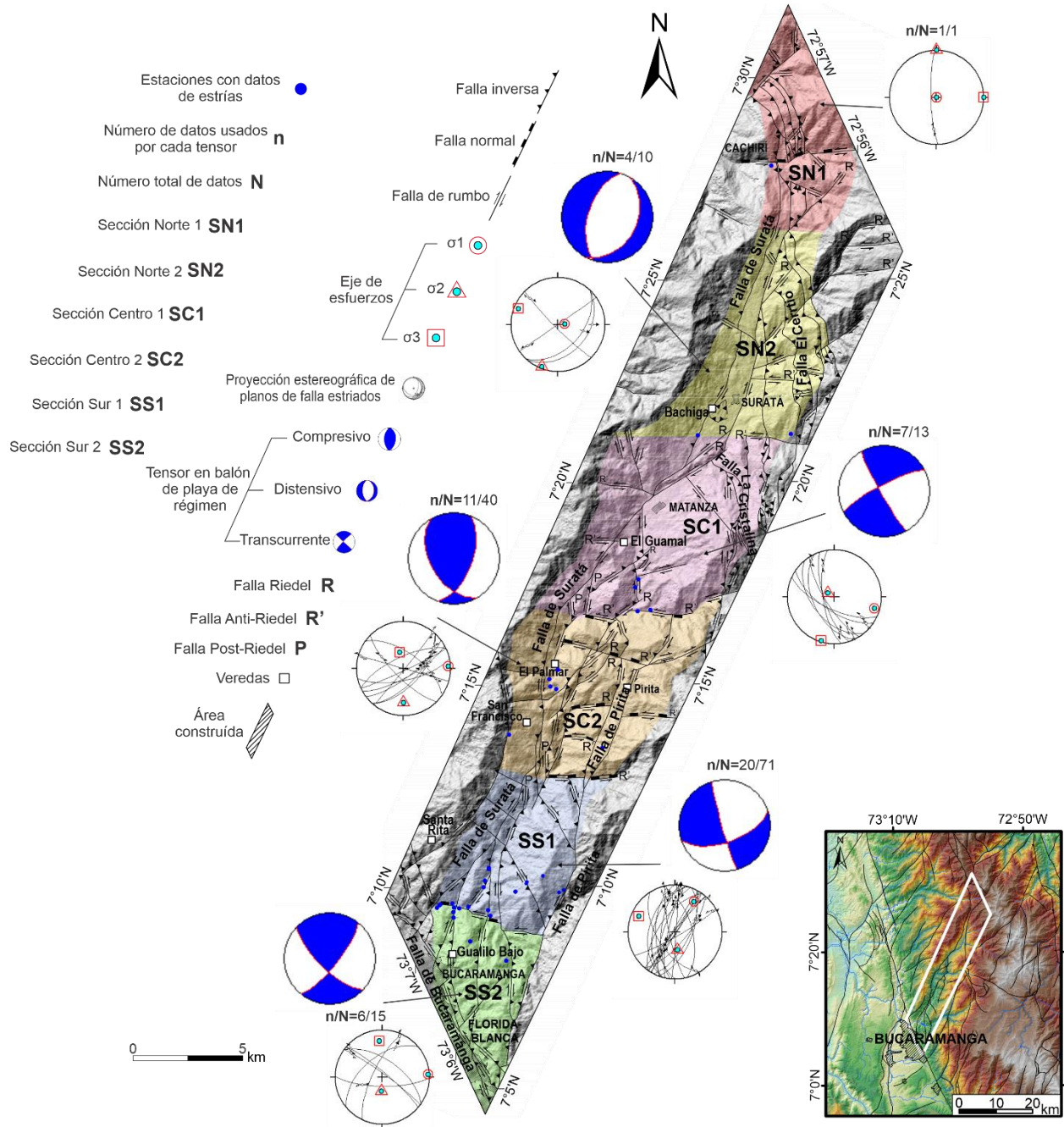


Nota. Tensores obtenidos mediante el procesamiento de los datos de planos estriados de falla en cada una de las secciones en las que se dividió el corredor de la Falla de Suratá.

Para obtener la secuencia temporal de los tensores en la zona de estudio se procesan las 36 estaciones que contienen datos de planos estriados en el corredor de la Falla de Suratá. Esta temporalidad de los tensores se puede asociar con factores como el orden de obtención durante el procesamiento, calidad, número de planos involucrados en cada tensor, poblaciones estadísticas (histograma), coherencia mecánica, coherencia cinemática y su relación con las estructuras cartografiadas. Aquellos tensores con indicadores cinemáticos de calidad regular (por número de planos involucrados) pueden corresponder a los más antiguos. En total, se procesaron 159 datos de planos estriados, de los cuales se identificó que el tensor W-E, con SHmax de 89° en azimut y en régimen de transcurrencia pura (16% de los datos), es el primero que arroja el software. Le sigue el tensor N-S, con SHmax de 4° en azimut y en régimen de distensión, resultando ser el más antiguo a pesar de tener un gran número de datos (22%) (Figura 17). Teniendo en cuenta estos resultados, se asume que la secuencia temporal se presenta en el orden de los tensores N-S, NE-SW, W-E y NW-SE en la zona de estudio, siendo la misma encontrada para el Macizo de Santander por Velandia (2017). Además, se evidencia que el tensor W-E desempeña un papel importante a nivel regional.

Figura 16

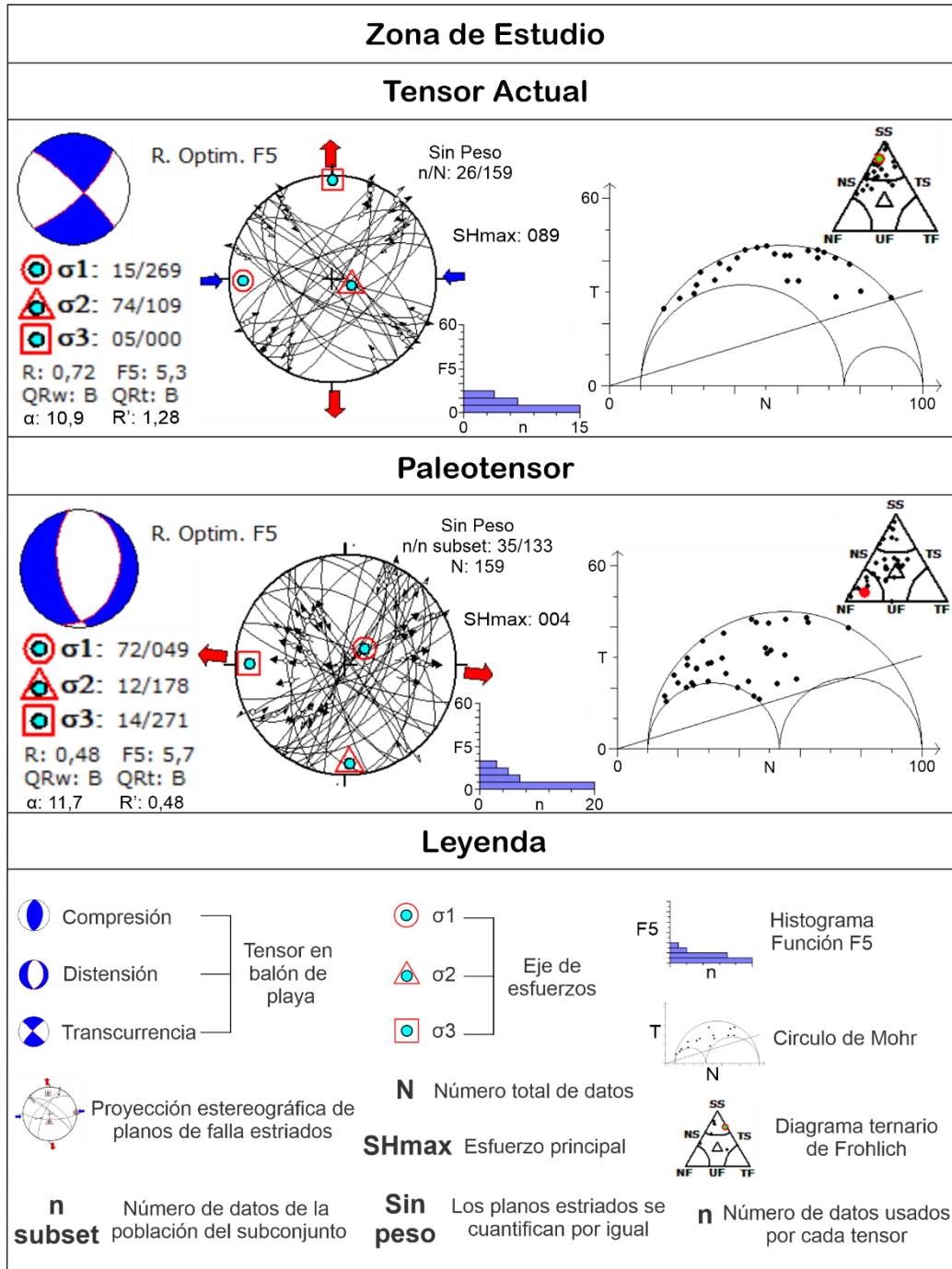
Mapa de tensores de esfuerzo de las secciones de estudio



Nota. El mapa representa la distribución de los tensores recientes a lo largo de las secciones en las que se dividió el corredor de la Falla de Surata.

Figura 17

Tensor actual y paleotensor de la Falla de Suratá



Nota. Tensor actual y antiguo de la zona de estudio, obtenidos a partir del procesamiento de los planos estriados de falla.

5.6 Análisis de diaclasas

Para examinar la distribución de las orientaciones preferenciales y la densidad de los datos de diaclasas medidos en campo a lo largo del corredor de la Falla de Suratá, se crearon diagramas de rosa que agrupan los datos por cada una de las secciones previamente descritas (Figura 18). Se recolectaron un total de 4.275 mediciones de diaclasas, entre las cuales se identificaron cuatro tendencias principales que se relacionan con las fallas mayores cartografiadas. Estas tendencias son: NW, N, NE y W-E.

Las diaclasas con dirección NW se encuentran especialmente en la Sección Centro 1 (SC1) y están vinculadas con la Falla La Cristalina y los cabalgamientos que afectan las unidades sedimentarias al norte de la zona de estudio. Es importante considerar que la influencia de la Falla de Charta (Velandia et al., 2016, 2020) podría estar afectando algunas de las mediciones de datos, ya que unas estaciones se ubican cerca del río del mismo nombre. Por otro lado, la tendencia N de las diaclasas se concentra mayoritariamente en la Sección Sur 1 (SS1) y se alinea paralelamente a la dirección de rumbo de las estructuras tipo P de la Falla de Suratá.

Las diaclasas con orientación NE están estrechamente relacionadas con el rumbo regional de la Falla de Suratá, así como con sus trazos sintéticos y la Falla de Pírita. Esta dirección de diaclasas se encuentra principalmente en la Sección Norte 1 (SN1), así como en las dos secciones del sur del área.

Las diaclasas con tendencia W-E se encuentran a un ángulo de 55° con respecto al rumbo principal de la Falla de Suratá. Esta familia de diaclasas se ubica principalmente en la Sección Norte 2 (SN2) y en menor medida en la Sección Sur 1 (SS1). La mayoría de estas diaclasas presentan un potencial de apertura debido a su orientación subparalela con la dirección del SHmax

del tensor regional W-E, lo que las hace especialmente relevantes para la formación de conductos que facilitan el flujo de fluidos en la zona.

5.7 Análisis de venas

A través de diagramas de rosa, se analizó la dirección preferencial y densidad de los datos de venas medidos en las estaciones de cada uno de los bloques o secciones previamente mencionadas a lo largo del corredor de la Falla de Suratá (Figura 18). En total, se recolectaron 137 datos en toda el área, con la excepción de la Sección Norte 1 (SN1), donde no fue posible encontrar venas durante las campañas de campo. Las direcciones principales que surgieron del análisis de las secciones son N-S y W-E.

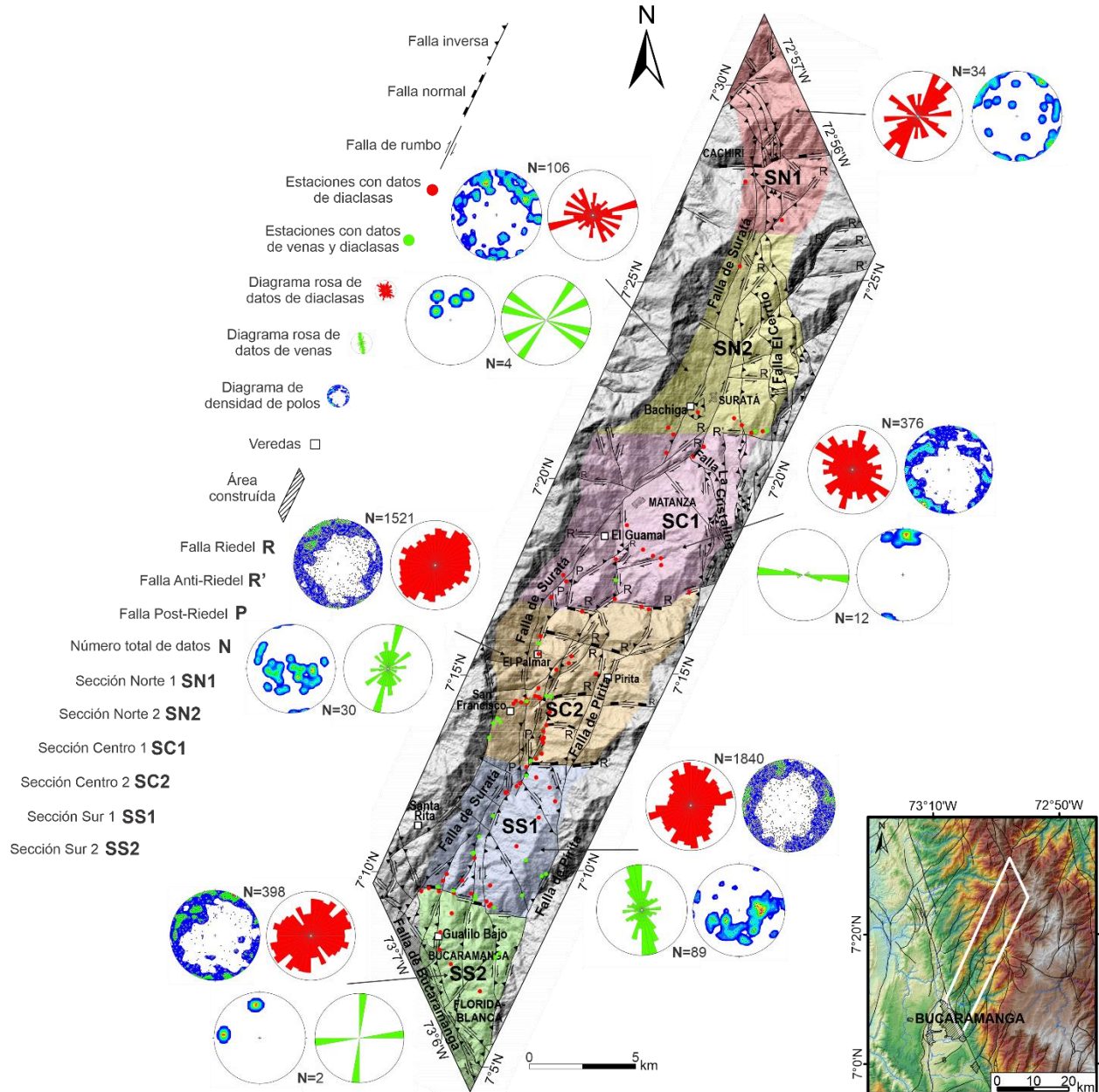
Las venas con orientación N-S se localizan principalmente en las secciones del sur y en la Sección Centro 2 (SC2), y se identificaron en las rocas del basamento metamórfico del Macizo de Santander, como el Neis de Bucaramanga y los Esquistos del Silgará. Es posible que estas venas estén relacionadas con el tensor más antiguo presente en la zona de estudio

Las venas con orientación W-E predominan en la Sección Centro 1 (SC1) y en menor medida en la Sección Sur 1 (SS1). Estas venas se encontraron principalmente en rocas sedimentarias del Cretácico, como la Fm. Rosa Blanca, y están asociadas al tensor actual de la zona de estudio. La tendencia de estas venas es de interés económico debido a que podrían portar minerales.

En cuanto a las venas en la Sección Norte 2 (SN2), no es posible determinar una orientación preferencial debido a la baja cantidad de datos recopilados y a que presentan dos direcciones diferentes, NW y NE. Adicionalmente, en la Sección Centro 1 (SC1), se identificó una zona de cizalla representada por venas sigmoidales de calcita en la Fm. Rosa Blanca. Esta zona de cizalla evidencia el comportamiento en profundidad de la Falla de Suratá y su cinemática dextral.

Figura 18

Mapa de la orientación de diaclasas y venas en el área de estudio



Nota. El mapa exhibe los diagramas de rosa de los datos de diaclasas y venas de cada uno de los bloques o secciones descritas.

6. Discusión

6.1 Estilo estructural de la Falla de Suratá y su relación con la geología regional

Se propone aquí que la Falla de Suratá, con azimut de rumbo de 200° (N20E), exhibe una cinemática dextral acompañada de componente vertical inverso y con vergencia general al E. En el sur de la zona de estudio, esta falla muestra un carácter predominantemente transpresivo, generando saltos laterales hacia la izquierda que resultan en la formación de lomos de presión, pliegues asociados a la falla (Figura 12), y una zona de cizalla con desplazamiento dextral evidenciada por venas sigmoidales de calcita (Figura 7). Sin embargo, en la sección norte de estudio, se observan características de transtensión local, como la cuenca elongada compuesta de coluviones y rocas sedimentarias del Cretácico, así como la laguna de falla del Alto de Cachirí (Figura 12).

La configuración actual de la Falla de Suratá muestra un patrón lenticular, con un complejo patrón Riedel en las secciones norte y centro del área, el cual deja en evidencia el carácter de rumbo dextral predominante en la falla, además de demostrar que esta estructura está bastante evolucionada con un corredor de falla relativamente ancho (en promedio 6000 m) si se consideran los splays y fallas menores subparalelas. Las fallas sintéticas tipo R y P de la Falla de Suratá, dan forma a su vez a relieves positivos (lomos) y depresiones a lo largo del cauce de los ríos. Los trazos R' corresponden a estructuras de distensión reflejada, con una orientación subparalela al SHmax del tensor regional W-E.

Además de definir la cinemática de la Falla de Suratá, se propone un modelo en profundidad para esta estructura y las otras principales (El Cerrito, La Cristalina y Pírita) en estilos de piel gruesa y delgada para mostrar desplazamientos combinados en la componente horizontal y

vertical, así como estructuras en flor y/o abanicos imbricados que afectan las rocas del basamento ígneo-metamórfico del Macizo de Santander.

Para la terminación sur de la zona de estudio, se propone una estructura en flor positiva y asimétrica con cinemática dextral e inversa a lo largo de las fallas de Suratá, como principal y Pírita al oriente (Figura 10D). En el análisis de las fallas secundarias con rumbo NNW, ubicadas entre las fallas principales de la estructura en flor, se observan desplazamientos dextrales (Figura 9). Un modelo estructural que puede representar la cinemática combinada es el dúplex contraccional (Figura 12), que se desarrolla en zonas de transferencia entre segmentos en un sistema de fallas de rumbo y en capas que desvían la orientación principal de la falla. Este modelo está justificado en los tensores obtenidos en SS1 y SS2, los cuales indican que el tensor regional W-E es responsable de la cinemática actual de las estructuras principales, mientras que la cinemática de las fallas secundarias se refleja en el tensor NE-SW. A pesar de la limitación de datos en SN1, se infiere que la terminación norte de la Falla de Suratá corresponde a un abanico imbricado de fallas inversas que afectan rocas sedimentarias, indicando un régimen más compresivo (Figura 9) (Ward et al., 1977a; Fuquen et al., 2010).

El análisis desde el paleotensor N-S hasta el tensor regional W-E, obtenidos tras el procesamiento de los planos estriados, evidencia la reactivación de la Falla de Suratá como una falla dextral con componente vertical inverso. Esto ratifica el origen transpresivo de la Cordillera Oriental (Kammer, 1999; Taboada et al., 2000; Sarmiento, 2001). Esta rotación de tensores ya ha sido reportada en otras estructuras al interior del Macizo de Santander (Velandia, 2017). Además, los estudios recientes de paleomagnetismo realizados en las rocas de la Fm. Jordán y Fm. Girón en la zona de estudio indican una rotación en sentido horario de su fábrica magnética, lo cual explica como la Falla de Suratá pasa de un régimen de distensión a uno de transcurrencia dextral

(Jiménez et al., 2022). Esta estructura es un ejemplo de las fallas antiguas con cinemática normal relacionadas con los procesos de distensión del Mesozoico, que luego experimentaron inversión tectónica (Kammer, 1993).

Desde una perspectiva regional, la Falla de Suratá corresponde a una extensión de la Zona Transversal de Boconó (Osorio et al., 2008), ya que presenta características similares a esta falla. Su desplazamiento lateral derecho resulta de la convergencia W-E entre el frente de deformación de la Cuña de Pamplona y el Macizo de Santander (Figura 3) (Velandia et al, 2020). A pesar de que esta cuña orogénica muestra un comportamiento radial de los tensores de esfuerzo, el tensor W-E controla la intersección con el macizo. Esto se evidencia también en la presencia de pliegues perpendiculares al SHmax, mapeados cerca a la Falla de Suratá (Figura 9). Además, esta cinemática dextral confirma el modelo de dominó transpresivo de las fallas secundarias con rumbo NE en el interior del Macizo de Santander, asociadas a las fallas principales sinestrales de Bucaramanga al occidente y Guamalito al oriente (Figura 3) (Velandia, 2017; Velandia et al., 2020).

6.2 Evolución

La evolución de las principales estructuras en el área de estudio está intrínsecamente ligada a la secuencia temporal en la que se interpretan los tensores de esfuerzo (Figura 19). El tensor N-S, considerado el más antiguo, se relaciona con los procesos distensivos del Mesozoico presentes en el Macizo de Santander (Restrepo-Pace, 1995). Esto se evidencia en la zona sur (SS1 y SS2) y en la Sección Centro 2, donde los tensores presentan esta orientación. Este tensor explica la cinemática normal de la Falla de Suratá que permitió la formación de la cuenca sedimentaria. Además, se asocia con la dirección predominante al N en las familias de diaclasas y venas en las rocas del basamento metamórfico (Neis de Bucaramanga y Esquistos del Silgará).

El tensor NE-SW abarca la mayoría del área y parece estar vinculado al inicio de la inversión tectónica de estructuras normales (Sarmiento, 2001, entre otros), documentadas desde el Cretácico tardío hasta el Paleoceno (Cediel et al., 2003). Este tensor explica el carácter transtensivo de la Falla de Bucaramanga (Velandia, 2017) y podría reflejar la influencia de la zona de Charta en la Falla de Suratá (Velandia et al., 2016). En la zona de estudio, la mayoría de los tensores NE-SW corresponden a esfuerzos de transtensión y transcurrencia pura, lo que posiblemente influyó en la tectónica distensiva y la formación de la cuenca elongada en SN2 y la laguna de falla en SN1. En SS1, este tensor explica la cinemática dextral de las estructuras internas entre la Falla de Suratá y la Falla de Pírita, mientras que también está relacionada con las familias de diaclasas paralelas a los trazos tipo Riedel de la Falla de Suratá.

El tensor W-E está ampliamente presente en toda el área y se nota más en las secciones centro y sur. Durante la fase actual de deformación, este tensor ha sido reactivado. Su aparición es más evidente las secciones mencionadas y se relaciona con el cambio de dirección del campo de esfuerzos desde el NE al W-E. Esto contribuyó a la inversión tectónica del NE de la Cordillera Oriental durante el Eoceno y Oligoceno (Cortés et al., 2005), así como a la convergencia entre el Macizo de Santander y el frente de la Cuña de Pamplona (Figura 3) (Velandia, 2017; Velandia et al., 2020). Este tensor, con una orientación $SH_{max}=89^\circ$, se justifica por la orientación de las venas en SC1. Además, explica el carácter transpresivo de la Falla de Suratá, produciendo la cinemática dextral actual, la componente vertical inversa, pliegues perpendiculares y oblicuos asociados, lomos de presión y una zona de cizalla dextral representada por venas de calcita sigmoidales. También explica estructuras paralelas como la Falla de Pírita que corresponde a un splay de la Falla de Suratá. De manera local, este tensor se deflecta con una orientación de SH_{max} de 75° de azimut debido a la transcurrencia dextral de la Falla de Suratá, lo que explica el desarrollo de los

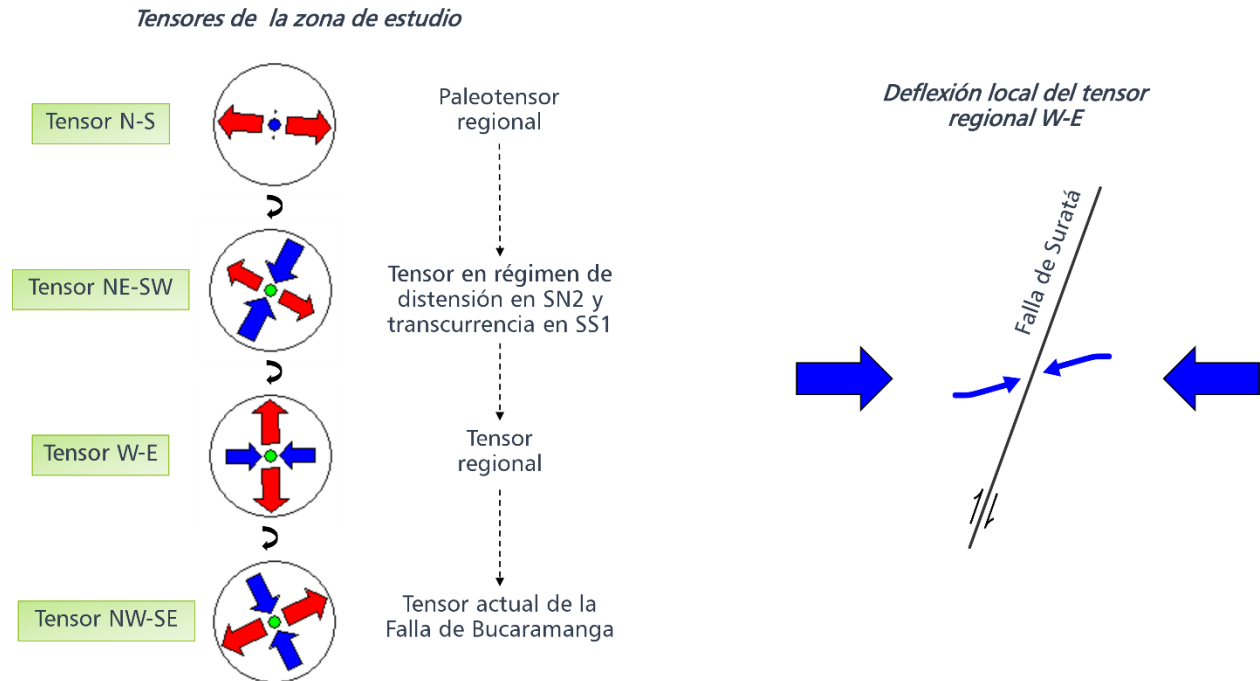
trazos sintéticos y antitéticos de esta estructura (R y R'). Esta deflexión se evidencia en el área de estudio en la orientación de las diaclasas tanto en SN2 como en SS1 y también ha sido reportada para la Zona Transversal de Boconó por Velandia (2017).

El tensor NW-SE es local y se manifiesta principalmente en las secciones sur. Este tensor resulta de la deflexión del tensor regional W-E, el cual explica la cinemática sinistral de la Falla de Bucaramanga (Velandia,2017; Velandia et al., 2020). A nivel regional, esta orientación podría estar relacionada con la convergencia NW-SE entre la placa Caribe y Suramericana que se inició en el Mioceno Temprano y continúa en la actualidad (Cortés et al., 2005). También es posible que este tensor esté relacionado con la acreción del Bloque Chocó-Panamá en el flanco NW de la Cordillera Occidental, el cual tuvo lugar desde el Oligoceno hasta el Mioceno (Duque-Caro, 1990; Taboada et al., 2000).

Desde el punto de vista del enfriamiento cortical, se reportan edades entre 50-60 Ma (Paleoceno-Eoceno) para el inicio de la exhumación del Macizo de Santander (Amaya, 2016). La Falla de Bucaramanga ha estado activa desde hace aproximadamente 40 Ma (Eoceno) y está relacionada con la exhumación asimétrica del macizo (van der Lelij et al., 2016). Considerando las edades de enfriamiento de 37-38 Ma reportadas para la Falla de Suratá en granodioritas mediante el método de huellas de fisión en circones (van der Lelij et al., 2016; Amaya, 2016), se sugiere que la actividad de las fallas de Bucaramanga y Suratá es coetánea y está relacionada con los eventos de exhumación.

Figura 19

Evolución de los tensores de esfuerzo en la zona de estudio



Nota. La figura muestra la evolución temporal de los tensores de esfuerzo y la deflexión local del tensor regional W-E para la Falla de Suratá.

6.3 Aplicación a recursos del subsuelo y amenazas geológicas

Teniendo en cuenta el análisis estructural de la Falla de Suratá en la zona de estudio, es importante destacar las potenciales implicaciones de esta estructura en amenazas geológicas, especialmente movimientos de remoción en masa, así como el transporte de fluidos desde el agua subterránea hasta minerales de interés económico.

Los diagramas de rosa obtenidos para las secciones o bloques cercanos a los distritos mineros de California-Vetas muestran que las familias de diaclasas y venas en SN2 y SC1 (Figura 18) presentan tendencias de orientación W-E, las cuales corresponden potencialmente a fracturas de tensión debido a que se alinean subparalelamente al SHmax del tensor regional W-E, cuya

deflexión local, con esfuerzo principal de 75° de azimut, justifica su apertura. Es importante señalar que estas mismas direcciones han sido previamente reportadas para venas, venillas y brechas altamente mineralizadas en oro epitermal, influenciadas por estructuras paralelas a la Falla de Suratá en los proyectos mineros de Angostura (ubicado en el municipio de California) y Vetas (Felder et al., 2005; Mantilla-Figueroa et al., 2013; Stubens, 2015).

Estas fracturas de tensión relacionadas con la Falla de Suratá representan canales potenciales que facilitan la circulación de agua subterránea, así como sustancias contaminantes que amenazan la calidad de los acuíferos y los cuerpos de agua superficial, dado que estos recursos hídricos son cruciales tanto para el suministro como el abastecimiento de los municipios de Cachirí, Suratá, Matanza y Bucaramanga. Es relevante destacar que esta orientación de fracturas abiertas se correlaciona con la conexión NE-SW identificada previamente para el flujo de agua subterránea en la zona del río Charta por Velandia et al. (2016).

Por otro lado, la alta susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa que afectan la zona de estudio (Ruiz et al., 2017) se debe principalmente a la presencia de depósitos cuaternarios, rocas sedimentarias y las pronunciadas pendientes generadas por el desplazamiento dextral y el componente inverso de la Falla de Suratá, los cuales contribuyen a la ocurrencia de movimientos de reptación, deslizamientos y caídas que impactan en las vías de acceso y el casco urbano de los municipios de Suratá (Mejía et al., 2017) y Matanza (Montero, 2017).

7. Conclusiones

Se presenta una actualización en la cartografía a una escala 1:50.000, la cual ha permitido la identificación de nuevas estructuras, tanto de deformación frágil como dúctil (pliegues en rocas sedimentarias). Además, se han corregido y propuesto nuevos trazos para las unidades litoestratigráficas aflorantes. Se presentan también una caracterización de los estilos estructurales, tanto de piel gruesa como delgada, para la mayoría de las estructuras principales de la zona de estudio.

La cartografía morfoestructural realizada revela que la configuración actual de la Falla de Suratá adopta un patrón lenticular conformado por su sistema Riedel (trazos tipo R y P). En el sur de la zona de estudio, se ha identificado un carácter transpresivo debido a la presencia de lomos de presión, pliegues asociados a la falla y zonas de cizalla. El componente de rumbo dextral de la Falla de Suratá ha definido transtensión en el norte del área, donde se presenta geoformas como la cuenca elongada y la laguna de falla del Alto de Cachirí, junto con otras morfoestructuras características de falla como facetas triangulares, sillas de falla, ganchos de flexión y lomos de obturación.

Este estudio contribuye al conocimiento geológico de la Falla de Suratá al proporcionar resultados de 14 tensores de esfuerzo obtenidos a partir de 159 planos estriados, medidos en 36 estaciones de campo a lo largo del corredor de falla. Del total de tensores, el 64 % corresponde a un régimen de transurrencia pura, el 7% muestra transtensión y el 29% restante se distribuye entre distensión y compresión.

La presencia de pliegues cartografiados en dirección N-S y NE-SW, la cinemática dextral y el componente inverso de las estructuras con rumbo NE de la zona de estudio, en las que destaca

las fallas de Suratá y Pírita, pueden explicarse mediante un tensor regional W-E ($SH_{max}=89^\circ$). Sin embargo, el análisis detallado de las zonas de deformación también ha revelado la presencia de tensores locales que explican la cinemática actual de otras estructuras principales en el área de estudio.

Las fallas de Suratá y Pírita dan forma a una estructura en flor positiva y asimétrica en su terminación sur, en un modelo de dúplex contraccional, donde las fallas secundarias, internas y confinadas en las estructuras mayores presentan la misma cinemática. Mientras que en la terminación norte de la Falla de Suratá, según lo indicado por la geología existente, se ha logrado identificar un carácter más compresivo de la falla, que se compone de cabalgamientos que levantan rocas sedimentarias.

El análisis realizado en la zona de estudio revela cómo la cinemática de la Falla de Suratá, la presencia de rocas sedimentarias y los depósitos cuaternarios tiene implicaciones potenciales en los movimientos de remoción en masa que afectan los municipios de Matanza y Suratá. Además, la deflexión del tensor regional W-E sugiere que las diaclasas y venas alineadas a la dirección del SH_{max} son de tensión y facilitan el flujo de fluidos, que va desde agua subterránea hasta los fluidos magmáticos mineralizados, dada su proximidad a los distritos mineros de Vetas y California.

El conocimiento adquirido sobre Falla de Suratá, enriquece significativamente la discusión en torno a la geología regional, respaldando la noción de un origen transpresivo para el Macizo de Santander. Esta conclusión se basa en el cambio de cinemática de la falla, pasando de un régimen de distensión a uno transpresivo lo que ejemplifica como las fallas normales del Mesozoico han respondido ante la inversión tectónica. Además, validan modelos previamente propuestos, como el estilo dominó transpresivo del Macizo de Santander, la Cuña de Pamplona y la Zona Transversal de Boconó, que se han relacionado con la actividad de la Falla de Suratá.

8. Recomendaciones

Realizar una cartografía morfoestructural a una escala más detallada e incorporar información sobre la actividad sísmica y las amenazas geológicas de la Falla de Suratá. Esto resultará fundamental para una comprensión más profunda y precisa de las implicaciones que tiene esta estructura en la región.

Llevar a cabo análisis mesoestructurales específicos en los Esquistos del Silgará. Esto aportará una comprensión más profunda de la génesis de la zona de cizalla y la formación de los pliegues tipo kink observados durante las expediciones de campo.

Recopilar datos de indicadores cinemáticos al norte de la zona de estudio. Esto brindará una perspectiva más completa sobre la terminación de la Falla de Suratá y su relación con las estructuras circundantes.

Referencias bibliográficas

Allmendinger, R., Cardozo, N., & Fisher, D. (2012). *Structural geology algorithms: Vectors and Tensors*. New York: Cambridge University Press.

Amaya, S. (2016). *Termocronología y geocronología del basamento metamórfico del Macizo de Santander, Departamento de Santander*. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia.

Amaya, S., Zuluaga, C., & Bernet, M. (2017). New fission-track age constraints on the exhumation of the central Santander Massif: Implications for the tectonic evolution of the Northern Andes, Colombia. *Lithos*, 282-283: 388-402.

Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and palaeostress reconstruction. In P. L. Hancock (Ed.), *Continental Deformation*. Oxford: Pergamon Press, pp. 53–100.

Audemard, F.E., & Audemard, F.A. (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: Relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction, *Tectonophysics*, 345: 299–327.

Babín, R., & Gómez, D. (2010). Problemas de geología estructural 7. Pliegues. *Reduccion (geología)*. Serie Geología Estructural. 2(1): 95-123.

Bejarano, D., & Navas., A. (2018). *Análisis estructural de los patrones de fracturamiento y su relación con el flujo de aguas subterráneas en inmediaciones del municipio de Tona, Macizo de Santander*. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander. 152p.

Boinet, T., Bourgois, J., Mendoza, H., & Vargas, R., (1985). Le Poinçon de Pamplona (Colombie): Un jalon de la frontière meridionale de la plaque Caraïbe. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 8: 403–413.

Cediel, F., Shaw, R., & Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean Block, in Bartolini, C., Buffler, R. T., and Blickwede, J., eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics*, American Association of Petroleum Geologists Memoir, 79: 815-848.

Cooper, M., Addison, F., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, J., & Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, 79(10): 1421-1443.

Cordani, U.G.; Cardona, A.; Jimenez, D. & Nutman, A. P. (2005): Geochronology of Proterozoic basement inliers from the Colombian Andes: tectonic history of remnants from a fragmented Grenville belt. En: Cardona, A.; Chew, D.; Valencia, V.; Bayona, G.; Miscovic, A. & Ibañez-Mejía, M. (2010): Grenvillian remnants in the Northern Andes: Rodinia and Phanerozoic paleogeographics perspectives. *Journal of South American Earth Sciences*, 29: 92-104.

Cortés, M., Angelier, J., & Colletta, B. (2005). Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. *Tectonics*, 24(27), TC1008, doi: 10.1029/2003TC001551.

Delvaux, D., & Sperner, B. (2003). Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program. In: *New Insights into Structural Interpretation and Modelling* (D. Nieuwland Ed.). Geological Society, London, Special Publications, 212: 75-100.

Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, K., Ruzhich, V., & San'kov, V. (1997). Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282, 1-38.

Doblas, M. (1998). Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics*, 295 (1–2), 187-197.

Duque-Caro, H. (1990). The Chocó Block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(1), 71-84. doi: 10.1016/0895-9811(90)90019-W.

Etchecopar, A., Vasseur, G., & Daignieres, M. (1981). An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Journal of Structural Geology*, 3, 51-65.

Felder, G., Ortiz, G., Campos, C., Monsalve, I., & Silva, A. (2005). ANGOSTURA PROJECT, A High Sulfidation Gold-Silver Deposit located in the Santander Complex of North Eastern Colombia. Greystar Resources Ltd. Thech. Report.

Forero-Ortega, A., Velandia, F., & Barragán-Coy, Evelin. (2020). Estilos estructurales y tensores de esfuerzos hacia el suroriente del Macizo de Santander (Colombia). *Boletín de Geología*, 42(2): 129-145.

Fossen, H., (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press, Cambridge. 463p.

Frohlich, C. (1992). Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 75, 193–198.

Fúquen, J., Ceballos, L., Pedraza, A., & Marín, E. (2010). *Geología de la plancha 98 Durania, escala 1:100.000*. Ingeominas.

García-Delgado, H., Machuca, S., Velandia, F., & Audemard, F. (2019). Along-strike variation in recent tectonic activity in the Santander Massif: New insights on landscape evolution in the Northern Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 98: 102472.

García-Ramírez, C., Casadiegos-Agudelo, L., & Castellanos-Meléndez, M. (2019). Petrology and geochemistry of the Silgara Schists in the Silos area, Santander Massif, Colombia. *DYNA*, 86(209): 271-280.

Healy, D.; Rizzo, R.E.; Cornwell, D.G.; Farrell, N.J.C.; Watkins, H.; Timms, N.E.; Gomez-Rivas, E.; & Smith, M. (2017). FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns. *Journal of Structural Geology*, 95, 1-16.

Hippolyte, J. C., Bergerat, F., Gordon, M.B., Bellier, O., & Espurt, N. (2012). Keys and pitfalls in mesoscale fault analysis and paleostress reconstructions, the use of Angelier's methods. *Tectonophysics*, 581, 144-162.

Jiménez, G., Speranza, F., Faccena, C., Bayona, G., & Mora, A. (2015). Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial fan: evidence for a ≤ 3 mm/yr slip rate for the Bucaramanga-Santa Marta Fault, Colombia. *J. South Am. Earth Sci.* 57, 12–22.

Jiménez, G.; Geissman, J.W.; & Bayona, G. (2022). Unraveling tectonic inversion and wrench deformation in the Eastern Cordillera (Northern Andes) with paleomagnetic and AMS data. *Tectonophysics*, 834, 229356.

Julivert, M. (1959). Geología de la vertiente W del macizo de Santander en el sector de Bucaramanga. *Boletín De Geología*, (3), 15–34.

Julivert, M., & Téllez, N. (1963). Sobre la presencia de fallas de edad precretácica y post-Girón (Jura-Triásico) en el flanco W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). *Universidad Industrial de Santander. Boletín de Geología*, (12): 5-17. Bucaramanga.

Kammer, A. (1993). Steeply Dipping Basement Faults and Associated Structures of the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *Geología Colombiana*, 18: 47-62.

Kammer, A. (1999). Observaciones acerca de un origen transpresivo de la Cordillera Oriental. *Geol. Colomb.* 24, 29–53.

Keller, E., & Pinter, N. (1999). *Active tectonics: Earthquakes, uplift and landscape*. First edition. Prentice Hall. New Jersey, 338p.

Mantilla-Figueroa, L. C., Bissig, T., Valencia, V., & Craig, H. (2013). The magmatic history of the Vetas-California mining district; Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 45: 235-249.

Mantilla-Figueroa, L. C., García-Ramírez, C.A., & Valencia, V.A. (2016). Propuesta de escisión de la denominada ‘Formación Silgará’ (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38(1): 33-50.

Mantilla-Figueroa, L. C., Mendoza, H., Bissig, T., & Craig, H. (2011). Nuevas evidencias sobre el magmatismo mioceno en el distrito minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 33(1).

Manzocchi, T. (2002). The connectivity of two-dimensional networks of spatially correlated fractures. *Water Resources Research*, 38(9), 1-20. <https://doi.org/10.1029/2000WR000180>.

Mejía, L., Fajardo, N., & Valencia, J. (2017). Zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa, escala 1:10.000 para el municipio de Suratá, Santander, aplicando métodos estadísticos multivariados. 24p.

Montero, J. (Ed.). (2017). *Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. Libros del Servicio Geológico Colombiano.

Moreno, D. (2021). *Geomorfometría y actividad tectónica reciente en el flanco occidental del Macizo de Santander*. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander.

Osorio, J., Hernández, C., Torres, E., & Botero, P. (2008). Modelo geodinámico del Macizo de Santander. Ingeominas.

Patarroyo-Camargo, G., Alarcón-Gómez, C., Torres-Parada, J., Díaz-Villamizar, J., Gómez-Coronado, J., Márquez-Prada, J., Pontón-Parada, L., & Barragán-Martínez, D. (2021). Reconocimiento geológico de la Formación La Luna en el sector de Matanza (Oeste del Macizo de Santander, Colombia). *Boletín de Geología*, 43(1): 35-51.

Petit, J.P. (1987). Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, 9, 597 – 608.

Priest, S.D., & Hudson, J.A., (1981). Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 18, 183e197.

Priest, S.D., (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Chapman & Hall, London, United Kingdom.

Restrepo-Pace, P.A. (1995). Late Precambrian to Early Mesozoic tectonic evolution of the Colombian Andes, based on new geochronological geochemical and isotopic data. PhD Thesis, University of Arizona, USA., 195p.

Royero, J., & Clavijo, J., (2001). Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander. Ingeominas.

Ruiz, G., Navarro, S. del R., Chaparro, J., Gamboa, C., Ramírez, K., Camargo, B., Trejos, G., & Pérez, R. (Eds.). (2017). *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia, una visión a escala 1:100.000*. Libros del Servicio Geológico Colombiano.

Sarmiento, L. (2001). Mesozoic rifting and cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models. PhD. Thesis. Vrije Universiteit Amsterdam, 296p.

Simon, J.L., (2019). Forty years of paleostress analysis: has it attained maturity? *J. Struct. Geol.* 125, 124–133.

SINGEO. (2012). Estándares de cartografía geológica digital para planchas a escala 1:100.000 y mapas departamentales versión 2. Servicio Geológico Colombiano. 122p.

Siravo, G., Fellin, M., Faccenna, C. & Maden, C. (2019). Transpression and the build-up of the cordillera: the example of the Bucaramanga Fault (Eastern Cordillera, Colombia). *Journal of the Geological Society.* 43p.

Sperner, B. & Zweigel, P. (2010). A plea for more caution in fault–slip analysis. *Tectonophysics*, 482, 29-41.

Stubens, T. (2015). Technical report on the updated mineral resource estimate for the Angostura gold-silver deposit, Santander department, Colombia. Canadian National Instrument NI43-101 technical report prepared by Micon International Limited for Eco Oro Minerals Corporation, Vancouver, Canada.

Taboada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., & Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and Intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5): 787-813

Tripathy, V. & Saha, D., (2013). Plate margin paleostress variations and intracontinental deformations in the evolution of the Cuddapah basin through Proterozoic. *Precambrian Research*, 235: 107-130.

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.

Van der Lelij, R., Spikings, R., & Mora, A. (2016). Thermochronology and tectonics of the Mérida Andes and the Santander Massif, NW South America. *Lithos*, 248: 220-239.

Van Der Pluijm, B., & Marshak, S. (2004). *Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics*. 2nd Edition, WW Norton, New York.

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*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 222p.

Velandia, F., Cetina, M., Castellanos, E., & Gómez, S. (2016). Análisis de fracturas y cinemática de fallas geológicas como primer aporte al modelo conceptual de aguas subterráneas en la zona de Charta, Macizo de Santander-Colombia. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 31(2): 37-56.

Velandia, F., García-Delgado, H., Zuluaga, C., López, J., Bermúdez, M., & Audemard, F. (2020). Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Norther Andes. *Journal of Structural Geology*, 137: 104087.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., & Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1-3): 1-132.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., Jaramillo, L., & Vargas, R. (1977a). Mapa geológico del cuadrángulo H-13 Pamplona, escala 1:100.000. Ingeominas.

Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., & Gómez, E. (1977b). Mapa geológico del cuadrángulo H-12 Bucaramanga, escala 1:100.000. Ingeominas.

Watkins, H., Bond, C.E., Healy, D., & Butler, R. W. H., (2015). Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal of Structural Geology* 72. 67-82.

Yong Technology Inc., (2014). GeoRose 0.5.0 A free geological Rose diagram and stereonet plotting program. Edmonton, Canada.