

ZONAS TRANSVERSALES Y SU RELACIÓN CON ESTRUCTURAS REGIONALES, FLANCO O -
CORDILLERA ORIENTAL.

Cindy Nathalia Araque Gómez

Jessika Lizeth Otero Ramírez

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Químicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2016

ZONAS TRANSVERSALES Y SU RELACIÓN CON ESTRUCTURAS REGIONALES, FLANCO O -
CORDILLERA ORIENTAL

Cindy Nathalia Araque Gómez

Jessika Lizeth Otero Ramírez

Trabajo de Grado para optar al título de:
Geólogo

Director:
Giovanny Jiménez
Geólogo PhD.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Químicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2016

DEDICATORIA

*Para mis padres, por brindarme el más sincero y puro amor, su apoyo incondicional en cada una de las metas que he emprendido, por siempre estar, y ser los mejores.
A mis hermanos, Yecid y Yordan, por llenar mi vida de risas y momentos inolvidables.*

Los amo infinitamente,

Jessika.

DEDICATORIA

Para los seres más importantes de mi vida. Esta, es solo una forma de darles las gracias por todo lo que le brindan a mi existir; por cada palabra, cada abrazo, cada beso y cada muestra de cariño... con todo mi amor

Nata.

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por ser el soporte y mayor motivación a lo largo de toda nuestra vida.

A nuestro director de tesis Giovanni Jiménez Díaz por sus consejos, enseñanzas, acompañamiento y apoyo incondicional, antes y durante del desarrollo de este proyecto.

A los profesores UIS que hicieron parte de nuestra formación académica en estos años de universidad.

A nuestros compañeros y amigos que han aportado su granito de arena en la realización de este trabajo, especialmente a Andrés, Juan David, Katalinyiseth, Liley y Dayanna.

¡Gracias a todos!

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	23
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	25
2. JUSTIFICACIÓN	28
3. OBJETIVOS.....	29
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	29
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	29
4. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	30
5. ANTECEDENTES.....	32
5.1. FALLA DEL SUÁREZ.....	32
5.2. LINEAMIENTO AL NORTE DE LA MESA DE LOS SANTOS.....	35
6. MARCO GEOLÓGICO	37
6.1. EVOLUCIÓN DE LA CORDILLERA ORIENTAL (CO _r) Y EL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA (VMM).....	38
7. MARCO TEÓRICO.....	40
7.1. CONCEPTOS GENERALES	40
7.1.1. Falla	40
7.1.2. Esfuerzo (Stress).....	40
7.1.3. Deformación (Strain).....	41
7.2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	41
7.2.1. Indicadores Cinemáticos.....	41
7.2.2. Medida de datos de deslizamiento de fallas	42

7.3.	METODOS DE ANÁLISIS PARA DATOS ESTRUCTURALES	44
7.3.1.	Método PBT.....	44
7.3.2.	Método de diedros rectos.....	45
7.3.3.	Circulo de MOHR.....	45
7.4.	REGÍMENES TECTÓNICOS.....	47
7.4.1.	Régimen compresivo.....	48
7.4.2.	Régimen distensivo	48
7.4.3.	Régimen transcurrente	49
7.5.	ZONAS TRANSVERSALES (ZT).....	49
8.	GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	51
8.1.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	51
8.2.	ESTRATIGRAFÍA.....	51
8.2.1.	Formación Jordán (Jj)	53
8.2.2.	Formación Girón (Jg).....	54
8.2.3.	Formación Los Santos (K1Ls).....	57
8.2.4.	Formación Rosablanca (K1r)	58
8.2.5.	Formación Bucaramanga	59
9.	METODOLOGÍA	61
9.1.	FASE INICIAL	61
9.2.	FASE DE CAMPO	61
9.2.1.	Medición de estrías.....	61
9.2.2.	Medición de fracturas	63
9.3.	FASE DE PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	64

9.3.1.	Procesamiento de datos	64
9.3.2.	Cortes geológicos	66
9.3.3.	Análisis de resultados.....	66
9.4.	FASE INFORME FINAL	66
10.	RESULTADOS	67
10.1.	CONTROL CARTOGRÁFICO	67
10.2.	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS ESTRUCTURALES.....	76
10.2.1.	Diaclasas.....	78
10.2.2.	Estrías	79
11.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	87
11.1.	CINEMÁTICA DE LAS ESTRUCTURAS.....	87
11.1.1.	Falla Los Santos	92
11.1.2.	Falla del Suárez.....	93
11.2.	EVOLUCIÓN GEOLÓGICA	94
11.3.	ZONAS TRANSVERSALES.....	96
11.4.	MODELO GEOLÓGICO.....	99
12.	CONCLUSIONES	101
13.	RECOMENDACIONES.....	103
	BIBLIOGRAFIA.....	104

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Bloque diagrama de la morfología del área de Bucaramanga y sus alrededores. Se muestran las Mesas de Ruitoque, Los Santos, y las posibles fallas que actúan sobre las mismas. 26
- Figura 2.** Caracterización gráfica de una zona transversal. La imagen izquierda representa las zonas transversales definidas por lineamientos de rampas laterales, terminaciones del rumbo de las fallas y cabeceo de pliegues. La imagen derecha, representa una zona transversal definida por una falla transversal y cambios en el estilo estructural. 27
- Figura 3.** Localización del área de estudio (Figura inferior). Se muestra además, la configuración tectónica del norte de Suramérica y Colombia..... 31
- Figura 4.** Falla del Suárez interpretada como una falla de cinemática normal y buzamiento al este. Izquierda: Cortes realizados por López and Barrero (2002), “Sec2. H-12 Bucaramanga” corresponde con el segmento del corte Puerto Wilches hasta Arauca correspondiente al cuadrángulo H12. El “Sec8e” corresponde con el segmento del corte Puerto Carare hasta Paz de Ariporo correspondiente a la plancha geológica 135 de San Gil. Derecha: Cortes geológicos de Juvier (1958) mostrando a la Falla del Suárez como una fractura de buzamiento al este. 33
- Figura 5.** Cortes estructurales donde se muestra a la Falla del Suárez actuando sobre rocas del Jurásico (Formación Girón “Jg”) y depósitos Cuaternarios (Abanico Aluvial de Bucaramanga, “AA”). La Falla del Suárez es interpretada como una estructura inversa. Los cortes originales presentan mayor longitud, sin embargo, por razones de espacio, solo se muestra la zona de los cortes donde se evidencia la acción de la Falla del Suárez. 34
- Figura 6.** Modelos planteados para la Falla del Suárez. Izquierda: Modelo para la Falla del Suárez mostrando un comportamiento normal hacia el sector sur e inverso hacia el sector norte. Derecha: Mapa estructural mostrando un movimiento lateral izquierdo de la Falla del Suárez. 35

Figura 7. Mapa de la Mesa de los Santos en donde se muestra al Lineamiento de la Mesa los Santos (Falla Los Santos) como una estructura inversa de alto ángulo. 36

Figura 8. Criterios e indicadores que pueden ser utilizados para determinar el sentido de movimiento de una falla. Los ejemplos son mostrados para fallas normales, pero los criterios son válidos para cualquier orientación de la falla. (1) Escalones Minerales; (2) Marcas de herramientas tectónicas; (3) Cizallas Riedel; (4) Crestas estilolíticas; (5) Facetas pulidas o rugosas; (6) *Tension gashes*; (7) Fracturas de cizallas conjugadas; (8a) Marcas parabólicas; (8b) burbujas deformadas en lavas. 42

Figura 9. Datos que pueden ser tomados a partir del producto del deslizamiento de fallas. El plano de la falla corresponde con el plano inclinado de color naranja claro; La línea roja (inclinada) corresponde a una estría; la línea roja que se observa sobre el plano superior, corresponde a la proyección de la estría. 43

Figura 10. Resultados a partir del procesamiento de datos con el método PBT en el software Win Tensor 5.8.4 Las flechas y bandas azules corresponden al eje de compresión y las flechas rojas y bandas claras (imagen derecha), corresponden con el eje de tensión. 44

Figura 11. Circulo de Mohr. Se muestra el eje horizontal y vertical correspondiente a los esfuerzos Normales y de Cizalla. Las estrellas representan planos donde el 3 corresponde al plano complementario del 1 y, además, corresponde con un plano perpendicular al plano 2, separados por 180°. ϑ es el ángulo entre el plano de falla y el esfuerzo máximo σ_1 46

Figura 12. Representación del círculo de Mohr junto a la envolvente de Coulomb. **a.** muestra las rectas que dividen los datos de fallas neoformadas, reactivadas y estables; **b.** muestra un ejemplo a partir de los datos analizados en el software WinTensor. Se observa un solo dato estable, mientras el resto de la población se encuentra en la región de datos reactivados. 47

Figura 13. Se muestran los tres regímenes tectónicos definidos según la ley de Anderson; régimen distensivo, régimen compresivo y régimen transcurrente, donde $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 48

Figura 14. Bloque diagrama esquemático mostrando una posible explicación de la terminación lateral de estratos debido a la acción de una rampa lateral, transversal a la dirección del transporte tectónico; la rampa lateral es la encargada del traspaso de la deformación entre las mismas.....	50
Figura 15. Columna estratigráfica del Valle Medio del Magdalena. Se muestran las unidades que fueron controladas a lo largo de la fase de campo (Formaciones Jordán, Girón, Los Santos y Rosablanca) y que son descritas en este capítulo (Periodo Jurásico y Cretácico).	52
Figura 16. Afloramiento de la Formación Jordán (Jj) en el Cañón del Río Sogamoso. Se observan al fondo los contactos entre las Formaciones Rosablanca (K1r), Los Santos (K1ls) y Girón (Jg).	53
Figura 17. Afloramientos de la Formación Girón en la zona de estudio. a) Capas gruesas de areniscas conglomeráticas intercaladas con capas de areniscas lodosas; se observa en la parte inferior una estructura de canal. b) Afloramiento altamente diaclasado en el que se presenta intercalación de areniscas y esporádicas capas de lodolitas, localizado en el municipio de Girón. c) Estructura de canal en un afloramiento sobre la vía al proyecto Relleno Sanitario Parque Chocóa. d) Laminación cruzada en estratos de areniscas conglomeráticas de grano grueso.....	54
Figura 18. Columna estratigráfica de la Formación Girón (Jg) levantada a lo largo de la vía que conduce al proyecto “Construcción del relleno sanitario parque Chocóa”. Ver ANEXO A.	56
Figura 19. Afloramientos pertenecientes a la Formación Los Santos. a) Capas horizontales de areniscas ubicadas en la Mesa de los Santos. B y C) Afloramientos de areniscas cuarzosas vía Girón – Betulia, se observan algunas capas verticalizadas.....	57
Figura 20. Contacto entre las Formaciones Girón y Los Santos. Fotografía tomada en la Vereda Chocóa (Municipio de Girón) al margen izquierdo de la quebrada los Montes.	58

Figura 21. Contacto entre la Formación Girón (Jg) y el miembro Órganos (Qbo), perteneciente a la Formación Bucaramanga. Fotografía tomada sobre la vía hacia la Vereda Soracá (Municipio de Girón).....	60
Figura 22. Afloramiento perteneciente al miembro Organos (Qbo), miembro inferior de la Formación Bucaramanga. Se observan los depósitos de rocas de tamaños gruesos intercalados con algunas rocas de menor tamaño. Fotografía tomada en la vía que desde Girón conduce al municipio de Zapatoca.	60
Figura 23. Plano estriado en una capa de arenisca perteneciente a la Formación Girón. Se observan los datos que son recolectados para definir la cinemática de la posible falla actuante (Pitch, dir de pitch, rumbo y buzamiento) además, se tiene como indicador cinemático los planos Riedel.....	62
Figura 24. Muestreo <i>Scanline</i> . Se utilizan dos líneas dispuestas de forma perpendicular entre ellas de tal forma que se evite el sesgo de orientación. Las líneas a trazos son las fracturas no muestreadas, mientras las líneas continuas son las que hacen parte del <i>scanline</i>	63
Figura 25. Línea de escaneo de fracturas para un afloramiento de la Formación Girón. ...	64
Figura 26. Interfaz del programa Win Tensor con los datos de estrías en uno de los sectores de la zona de estudio.....	65
Figura 27. Mapa geológico de la zona de estudio. Se observan las líneas de los cortes realizados (Figura 29). ANEXO B.	71
Figura 28. Mapa geológico regional. Se observan las líneas de los cortes locales y los de escala regional (Ver Figura 29 y Figura 30, respectivamente). ANEXO C.	72
Figura 29. Cortes geológicos del el área de estudio. Ver ubicación y leyenda geológica en la Figura 27. ANEXO D.....	74
Figura 30. Cortes geológicos regionales. Ver ubicación y leyenda geológica en la Figura 28. ANEXO E.	75
Figura 31. Ubicación de los diferentes sectores estudiados en la zona de estudio. Se observan también las estaciones realizadas en el desarrollo del proyecto.	77

Figura 32. Diagramas rosa para los datos de diaclasas hallados en cada sector del área de estudio. Se muestran la orientación de los principales conjuntos de fracturas en azimuth de rumbo.....	79
Figura 33. Tensores de esfuerzos y círculos de Mohr hallados para los datos de estrías reunidos en SeG; izquierda: método PBT; derecha: diedros rectos. Se evidencia un tensor transpresivo y una orientación del esfuerzo máximo de 53-62°; la mayoría de los de datos en el dominio de reactivación.....	80
Figura 34. Diagrama rosa de estrías para el SeG. Se observan las principales tendencias para las estrías usadas en el análisis.....	81
Figura 35. Gráficos estructurales por el método PBT (izquierda) y diedros rectos (derecha), con sus respectivos círculos de Mohr hallados para los datos compatibles de estrías en SeC. Se muestra un tensor radial a transpresivo; la mayoría de los datos se distribuyeron en los dominios de reactivación y neoformación.....	82
Figura 36. Tensores de esfuerzos y círculos de Mohr hallados para los datos incompatibles de estrías reunidos en SeC; izquierda: método PBT; derecha: diedros rectos. Se evidencia un tensor transpresivo; la mayoría de los datos se distribuyeron en los dominios de reactivación y neoformación.....	83
Figura 37. Diagrama rosa para los datos de estrías tomados en el SeC. A la izquierda se observa la tendencia principal para los datos compatibles y a la derecha, las principales direcciones de los datos incompatibles.....	83
Figura 38. Gráficos estructurales por el método PBT (izquierda) y diedros rectos (derecha), con sus respectivos círculos de Mohr hallados para los datos compatibles de estrías en SeC. Se muestra un tensor transpresivo; la mayoría de los datos se distribuyeron en los dominios de reactivación.....	84
Figura 39. Diagrama rosa para los datos de planos estriados medidos en el SeRs. Se muestran las tendencias principales que toman los datos en este sector.....	85
Figura 40. Tensores de esfuerzos por el método PBT hallados para los datos de cada subconjunto del sector Río Sogamoso. Los tensores de esfuerzos son similares para los	

tres puntos, con una dirección NE-SO; los datos estriados están ubicados en los sectores de reactivación y esporádicamente en el sector de reactivación.....	86
Figura 41. Distribución tensores de esfuerzos por el método ejes PBT y diedros rectos hallados para los datos de planos estriados en cada sector.....	88
Figura 42. Tensores de esfuerzos por el método PBT hallados para los datos de cada subconjunto del sector Río Sogamoso.....	89
Figura 43. Diagramas rosa para los datos de diaclasas localizados en el mapa estructural de la zona de estudio. Se observan los diagrama rosa ubicados en cada sector estudiado.	91
Figura 44. Trazo Falla Los Santos. Se muestran las unidades afectadas (K1ls: Formación Los Santos; Jg: Formación Girón) y el salto estratigráfico de la misma. Fotografía tomada al margen derecho de la vía Zapatoca-Bucaramanga.	92
Figura 45. Fotografía tomada en el Sector Río Sogamoso (SeRS). Se observa el plano de la Falla del Suárez de buzamiento NO, poniendo en contacto a la Formación Girón (Jg) con las Formaciones Los Santos (K1ls) y Rosablanca (K1r).....	93
Figura 46. Panorámica tomada en la vereda Soracá (Municipio de Girón), donde se observa el plano de la Falla del Suárez poniendo en contacto a la Formación Girón (Jg) sobre el Miembro Órganos (Qbo) de la Formación Bucaramanga.	94
Figura 47. Bloque diagrama ilustrativo de la zona de estudio para el Jurásico tardío - Cretácico temprano.	95
Figura 48. Bloque diagrama ilustrativo de la zona de estudio. Se muestra la influencia de la Falla Los Santos sobre la Falla del Suárez, evidenciando la curvatura en el rumbo de esta última. La imagen derecha muestra la vista en planta de ambas estructuras.	96
Figura 49. Curvatura de la Falla del Suárez en el Sector del Río Sogamoso. Se observa los trazos de la Falla los Santos (FLS) y de la Falla del Suárez (FS) (Color rojo), además de las Formaciones cartografiadas en la zona (Jg: Formación Girón, K1ls: Formación Los Santos, K1r: Formación Rosablanca).	97

Figura 50. Bloque diagrama ilustrativa a escala regional. Se observa la zona transversal planteada y las estructuras. 98

Figura 51. Estilos estructurales observados. A la izquierda, fuera de la zona de estudio, se muestra una deformación de tipo *Thin-Skinned* y a la derecha, en la zona de estudio, deformación de tipo *Thick-Skinned*. 100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones realizadas durante el trabajo de campo. Se muestran las respectivas coordenadas planas en Datum MAGNA Colombia Bogota.....	68
Tabla 2. Espesores reportados para el Valle Medio del Magdalena. Se mencionan además, los espesores utilizados para este trabajo. (Para un mejor control geométrico de los cortes estructurales, algunos espesores presentan un margen de error con respecto a los reportados).	73

RESUMEN

TITULO:

ZONAS TRANSVERSALES Y SU RELACIÓN CON ESTRUCTURAS REGIONALES, FLANCO O-CORDILLERA ORIENTAL.*

AUTORES:

CINDY NATHALIA ARAQUE GÓMEZ

JESSIKA LIZETH OTERO RAMÍREZ**

PALABRAS CLAVES:

Zonas transversales, Falla Los Santos, Falla del Suárez, rampas laterales.

Las zonas transversales son áreas que comprenden diferentes estructuras como rampas laterales, rampas oblicuas, fallas transversales, zonas de acomodación y zonas de transferencia. Con el fin de analizar la posible existencia de una zona transversal en el área de estudio y con base principalmente en el cambio de dirección del trazo de la Falla del Suárez, se llevó a cabo un análisis estructural a partir de controles estratigráficos, datos cinemáticos, datos de fracturas y cortes geológicos. Así, se definió al lineamiento ubicado al norte de la Mesa de Los Santos sobre la quebrada Los Montes, como una falla de rumbo dextral de componente normal, que se relaciona con la Falla del Suárez en el punto donde esta cambia su rumbo; además, la Falla del Suárez, una antigua estructura normal invertida durante el Mastrichtiano-Paleoceno, se caracterizó como una falla inversa con componente dextral y vergencia este. En este proyecto se propone la presencia de una zona transversal localizada sobre el flanco Oeste de la Cordillera Oriental hasta el Valle Medio del Magdalena, evidenciada por la presencia de estructuras de rumbo como la Falla Los Santos, el cambio de dirección en el trazo de la Falla del Suárez, la presencia de una rampa lateral generada por la Falla Los Santos y el cabeceo del Sinclinal de Zapatoca y Nuevo Mundo.

* Trabajo de grado. Modalidad Investigación.

**Escuela de Geología. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Universidad Industrial de Santander. Director: Ph.D. Giovanni Jiménez Díaz.

ABSTRACT

TITLE: TRANSVERSE ZONES AND ITS RELATIONSHIP WITH REGIONAL STRUCTURES, WESTERN FLANK, EASTERN CORDILLERA.*

AUTHORS:

CINDY NATHALIA ARAQUE GÓMEZ

JESSIKA LIZETH OTERO RAMIREZ**

KEYWORDS:

Transverse zones, Los Santos Fault, Suárez Fault, lateral ramps.

Transverse zones include different structures such as lateral and oblique ramps, transverse faults and accommodation and transfer zones. For the analysis of a transverse zone inferred at the study area, showed on an along-strike change for the Suarez Fault, a structural analysis were made based on stratigraphy controls, kinematic and fracture data and transversal sections. Thus, the alignment located at the northern of the Mesa de Los Santos, was defined as a dextral fault with a normal component related to the Suarez Fault at the point where its strike changes. Besides, the Suarez Fault, an ancient normal structure inverted during the Maastrichtian-Paleocene, was described as a reverse fault with a west dip and a right-slip movement. We propose the development of a transverse zone situated on the western flank of the Eastern Cordillera towards the Middle Magdalena Valley. The transverse zone is demonstrated by the presence of strike-slip structures such as Los Santos Fault, along-strike changes like the presented at the Suarez Fault, lateral ramps as the one generated by Los Santos Fault and plunge folds as the Zapatoaca and Nuevo Mundo synclinal.

* Bachelor Thesis.

** Escuela de Geología. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Universidad Industrial de Santander. Director: Ph.D. Giovanni Jiménez Díaz.

INTRODUCCIÓN

El bloque Norandino está conformado por los Andes del Ecuador, Venezuela y Colombia, y se localiza en el margen noroccidental de Sur América (Cediel *et al.*, 2003). Los Andes Colombianos, agrupan tres cadenas montañosas definidas como las Cordilleras Occidental, Central y Oriental, las cuales presentan diferentes tipos de roca y arreglos tectónicos (Cediel *et al.*, 2003; Mora *et al.*, 2006; Sarmiento *et al.*, 2006). La Cordillera Oriental, es la más joven de los Andes Colombianos (Cooper *et al.*, 1995; Caballero *et al.*, 2010) y está conformada por rocas Pre-Cámbricas, como las encontradas en el Macizo de Santander (Goldsmith *et al.*, 1971; Ward *et al.*, 1973), Floresta (Ulloa *et al.*, 2003) y Garzón (Mora *et al.*, 2006), y por rocas sedimentarias de diferentes proveniencias, depositadas desde inicios del Triásico hasta el paleógeno (Royero y Clavijo, 2001; Ulloa *et al.*, 2003; Ward *et al.*, 1973). La Cordillera Oriental ha experimentado diferentes fases de deformación a lo largo de su evolución, las cuales son evidenciadas por fuertes plegamientos, fallas inversas de alto ángulo y fallas de cinemática transpresiva y transtensiva (Irving, 1971), generando una posible relación entre estas fases con las estructuras a estudiar en este proyecto.

La zona de estudio se localiza en la depresión generada por los bloques yacentes de las Fallas del Suárez y Bucaramanga, en el flanco Oeste de la Cordillera Oriental. Ésta depresión topográfica define un espacio para la acomodación de una serie de lineamientos transversales a la Falla del Suárez. Uno de estos lineamientos es nombrado por Julivert (1958) y por Vargas y Niño (1992), y recibe el nombre de Falla Los Santos; y junto con la Falla del Suárez (Desde su interacción con la Falla Los Santos hasta el municipio de Girón) son el foco de esta investigación. El objetivo principal de este trabajo consiste en determinar el comportamiento cinemático y las características del lineamiento y su relación con la Falla del Suárez para el área. De esta forma, se busca definir el grado de afectación que ejercen estas estructuras sobre el área que comprenden, la deformación a la que se encuentran asociadas y la posible relación que pueden presentar

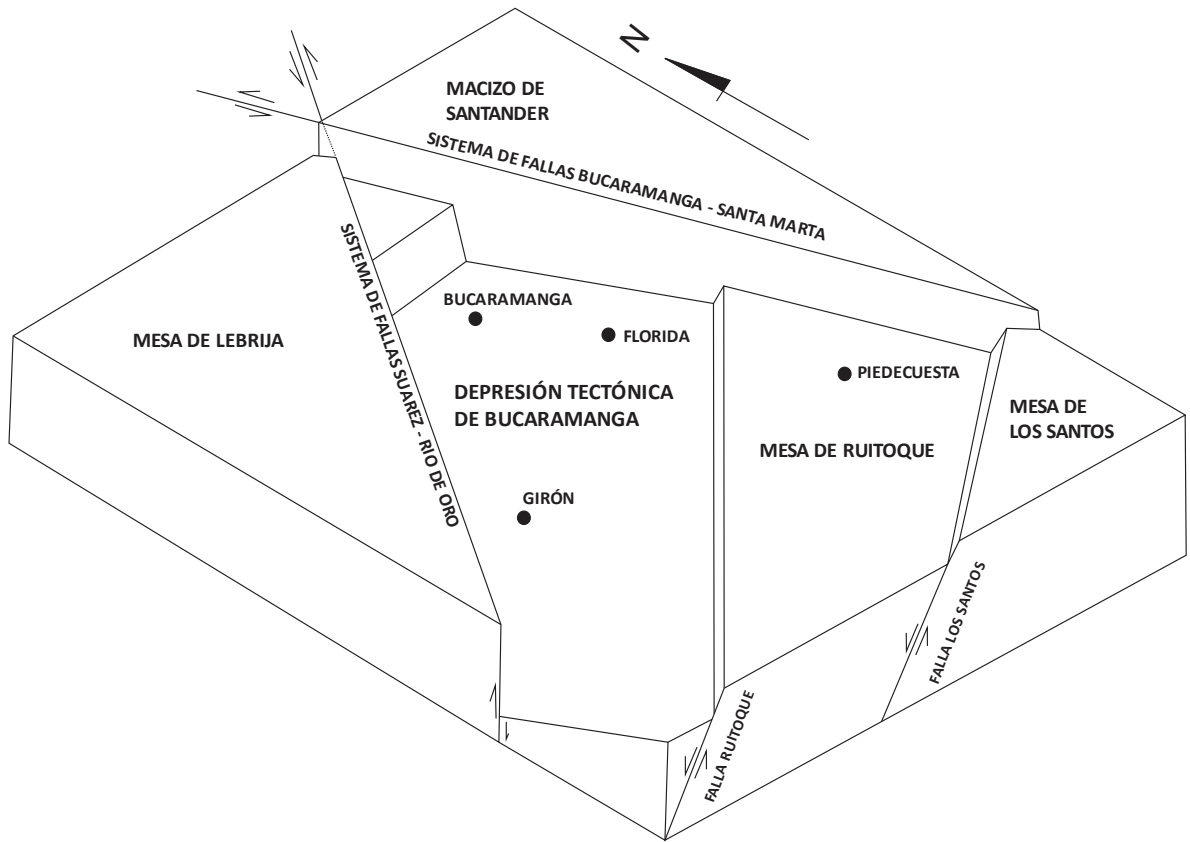
con el estilo estructural regional ya definido en zonas como el Valle Medio del Magdalena. Esta posible relación está basada en la conexión existente durante la evolución de la Cordillera Oriental con la cuenca del VMM (Caballero *et al.*, 2010), y puede estar ligada a la presencia de zonas transversales.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Vargas y Niño (1992) proponen una estructura definida como la Falla Los Santos, de cinemática normal y localizada en el bloque yacente de las Fallas del Suárez y Bucaramanga (Figura 1); estructura de la cual, hasta el momento, existe información muy escasa. En cercanías al río Sogamoso, la Falla Los Santos es mostrada en los mapas (ver Plancha 120, Ward *et al.*, 1973) como un lineamiento en contacto con el trazo de La Falla del Suárez, donde esta última sufre un cambio en su rumbo generándose la curvatura de la misma. La Falla del Suárez, ha sido definida por varios autores; la mayoría la describen como una estructura de tipo inverso con componente en rumbo sinistral y buzamiento al oeste (Diederix *et al.*, 2008; Londoño, 1982; Paris y Sarria, 1988; Pulido (1979); Vargas y Niño, 1992); también ha sido propuesta como una falla normal con buzamiento al este (Julivert, 1958; López and Barrero, 2002; Tellez, 1964); como una falla de comportamiento normal hacia el sector sur e inverso hacia el sector norte (Díaz y Suárez, 1998); y como una falla de movimiento lateral izquierdo (Acosta *et al.*, 2004).

El principal problema a resolver consiste en el análisis estructural y la caracterización del lineamiento nombrado como Falla Los Santos y de la Falla del Suárez (Desde su interacción con la Falla Los Santos hasta el municipio de Girón). También, se busca definir que tanto afectan el área que comprenden, cual es la deformación asociada a las mismas y que relación pueden presentar con el estilo estructural regional.

Figura 1. Bloque diagrama de la morfología del área de Bucaramanga y sus alrededores. Se muestran las Mesas de Ruitoque, Los Santos, y las posibles fallas que actúan sobre las mismas.

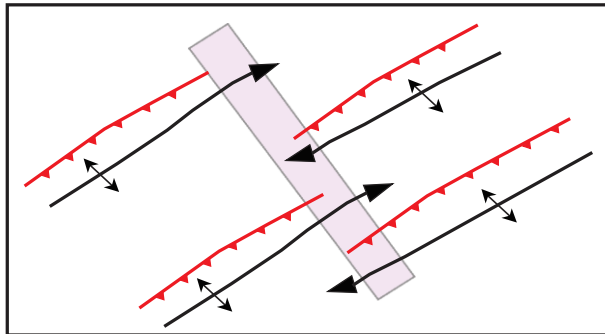


Fuente: Vargas y Niño, 1992.

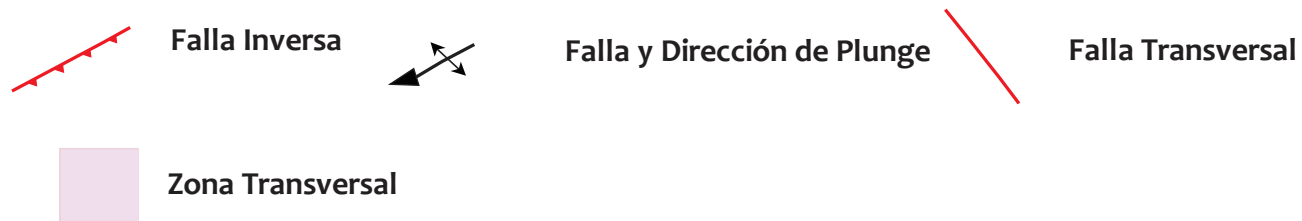
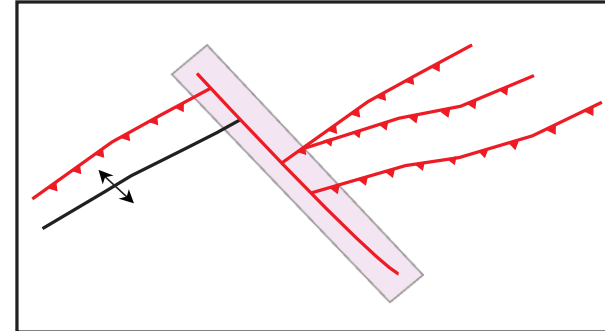
Además del análisis estructural planteado para estas fallas, se desea aclarar la hipótesis de la relación entre La Falla Los Santos y una posible zona transversal que podría conectar con el Valle Medio del Magdalena. Esta hipótesis es planteada teniendo como base que las zonas transversales están conformadas por zonas de transferencia, fallas transversales, rampas laterales, y su expresión es representada por el cambio o terminación abrupta del rumbo de estructuras (Figura 2), (Thomas, 1990). Para la zona de estudio, la posible zona transversal puede ser evidenciada por una rampa lateral que afecta a la Falla del Suárez, generando un cambio en su rumbo cerca del Río Sogamoso.

Figura 2. Caracterización gráfica de una zona transversal. La imagen izquierda representa las zonas transversales definidas por lineamientos de rampas laterales, terminaciones del rumbo de las fallas y cabeceo de pliegues. La imagen derecha, representa una zona transversal definida por una falla transversal y cambios en el estilo estructural.

Zonas Transversales definidas por lineamientos de rampas laterales, terminaciones de fallas o a lo largo del rumbo y el plunge de pliegues.



Zonas Transversales definidas por fallas transversales y cambios en el estilo estructural.



Fuente: Jiménez *et al.* (2012).

2. JUSTIFICACIÓN

Las diferentes fases de deformación que han tomado lugar durante la evolución de la Cordillera Oriental, evidenciadas por fuertes plegamientos, fallas inversas de alto ángulo y fallas de cinemática transpresiva y transtensiva (Irving, 1971), pueden llegar a relacionarse con la formación de estructuras como la Falla Los Santos. La caracterización de ésta y de la parte norte de la Falla del Suárez, aportarán al conocimiento de ambas estructuras, aclarando su comportamiento cinemático y mutua interacción. Lo anterior, para mostrar la influencia que ejercen fallas transversales (e.g. Falla Los Santos) con respecto a cambios en la geometría de estructuras longitudinales cercanas (Falla del Suárez).

Las zonas transversales, como se indicó anteriormente, pueden desarrollarse como resultado de acomodación o de fallas que distribuyen los esfuerzos a los lados de estas zonas, generando así una diferencia notable en las características de las estructuras que se observan alrededor de las mismas. Este trabajo de investigación, genera un mejor entendimiento en la evolución estructural del Valle Medio del Magdalena y la Cordillera Oriental, planteando la posible existencia de una zona transversal para el Valle Medio del Magdalena.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Definir la cinemática del lineamiento ubicado al norte de la Mesa de Los Santos, sobre la Quebrada Los Montes, mediante indicadores cinemáticos; y su relación con la Falla del Suárez.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un control estratigráfico y estructural a escala 1:25000 en el sector norte de la Mesa de Los Santos y en el corredor de la Falla del Suárez para la zona de estudio.

- Elaborar 4 cortes estructurales que involucren el lineamiento al norte de la Mesa de Los Santos y la Falla del Suárez.

- Determinar la causa del cambio de rumbo que toma la Falla del Suárez en cercanías al Río Sogamoso.

4. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está localizada en el flanco oeste de la Cordillera Oriental, y es definida como una depresión topográfica generada por los bloques yacentes de las Fallas Bucaramanga y del Suárez (Figura 1 y Figura 3). La Falla Bucaramanga corresponde con el límite este de la zona de estudio y ha sido interpretada como una falla de movimiento sinistral (Acosta et al., 2004; Diederix et al., 2008; Paris et al., 2000 y otros). Por otra parte, la Falla del Suárez, corresponde al límite oeste de la zona, se encuentra orientada en dirección general NNE-SSO, presenta una longitud de aproximadamente 145 km (Montes y Sandoval, 2001), y converge al norte con la Falla Bucaramanga (Navas, 1962; Diederix et al., 2008) en un ángulo entre fallas de aproximadamente 35° (Diederix et al., 2008; Diederix et al., 2009).

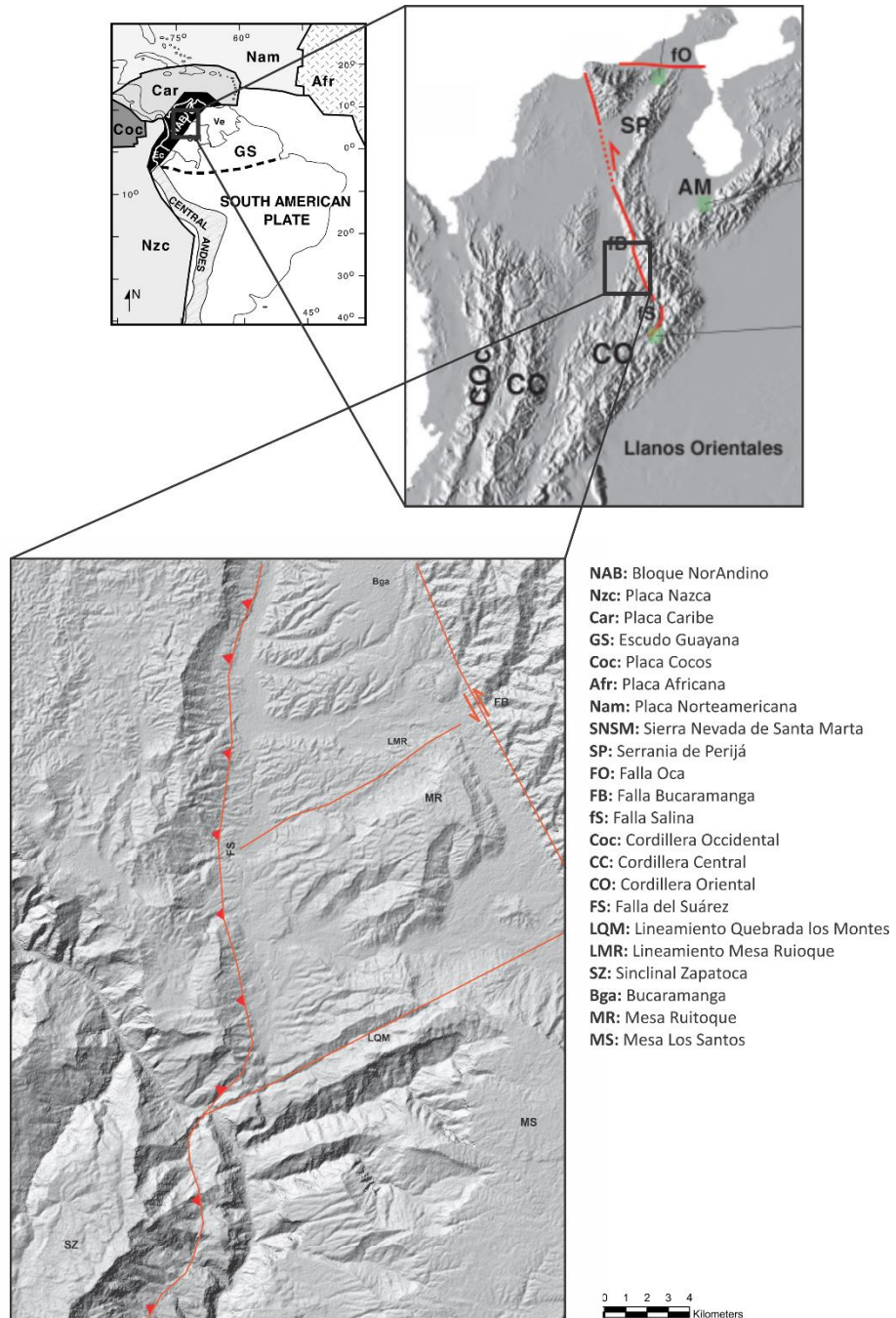
El enfoque de este trabajo, se concentra en la zona que se extiende a lo largo del valle de la quebrada Los Montes, sobre la Mesa de Los Santos (MS) y en cercanías a su confluencia con la falla del Suárez, en la vía que desde Bucaramanga conduce al municipio de Zapatoca (Figura 3). Teniendo en cuenta que el objetivo principal del trabajo es definir el estilo estructural del lineamiento localizado al norte de la Mesa de Los Santos (Falla Los Santos) y el de la Falla del Suárez, y por lo tanto, conocer el área de afectación que generan las mismas, se enmarca una zona comprendida entre las coordenadas planas de Gauss (datum Bogotá Central):

X: 1'250.000 – 1'285.000

Y: 1'090.000 – 1'115.000

Las Coordenadas se encuentran incluidas en la plancha topográfica 120-IV-A y 120-IV-B del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Figura 3. Localización del área de estudio (Figura inferior). Se muestra además, la configuración tectónica del norte de Suramérica y Colombia.



Fuente: Cediél *et al.* (2003). Modificada por los autores.

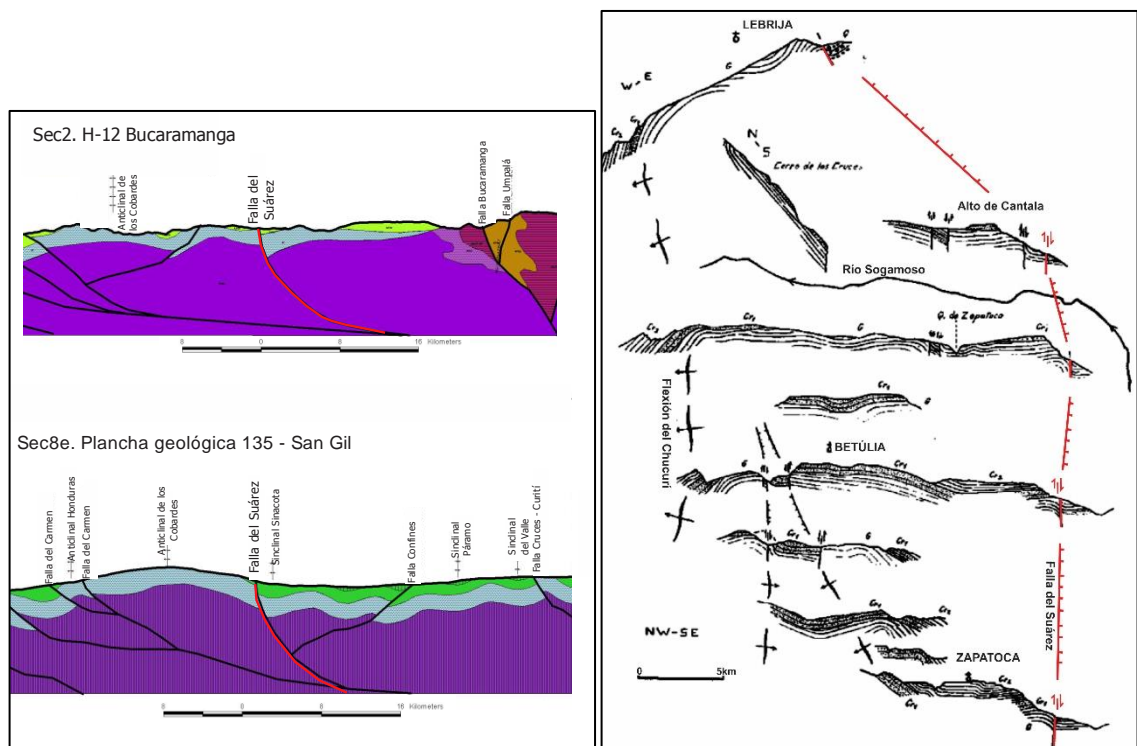
5. ANTECEDENTES

5.1. FALLA DEL SUÁREZ

Julivert (1958) describe a la Falla del Suárez como una fractura con vergencia al este de orientación general NE-SO que al sur presenta un carácter de flexión. La falla se orienta paralela al río Suárez hasta la unión de este con el Río Chicamocha, en donde se forma el Río Sogamoso. A partir de este punto, la falla presenta una curvatura para luego orientarse paralela al Río de Oro. Julivert (1961) indica que la Falla del Suárez rompe longitudinalmente la zona de las Mesas, formando una región occidental compuesta por la plataforma de Lebrija y macizo de Zapatoca, y otra oriental formada por las mesas de Ruitoque, Los Santos y el área de Barichara y San Gil. Además, afirma que unidades más antiguas como la Formación Girón afloran hacia el norte y se profundiza al sur, en donde las unidades cretácicas afloran; esto debido a que todas las estructuras tienden a hundirse hacia el sur. Navas (1962) indica que la prolongación al norte de la Falla del Suárez descrita por Julivert (1958) toma el nombre de Falla del Río de Oro, la cual va paralela al río del mismo nombre, llamando a todo el sistema como Falla del Suárez – Río de Oro.

Más adelante, Julivert y Tellez (1963) le atribuyen un periodo de activación a la Falla del Suárez contemporáneo o posterior a los depósitos cuaternarios colocando como evidencia la verticalización del plano de falla sobre la margen izquierda del río de Oro. En un estudio a la Mesa de Barichara, Tellez (1964) hace alusión a la Falla Flexión del Suárez como uno de los rasgos sobresalientes de la tectónica post-cretácica en la zona, y define como una falla normal de buzamiento al este, responsable en parte del basculamiento al oeste de la región de mesas. López y Barrero (2002) refuerzan los anteriores trabajos mediante unos cortes regionales en donde muestran la vergencia al este y el comportamiento normal de la Falla del Suárez (Figura 4).

Figura 4. Falla del Suárez interpretada como una falla de cinemática normal y buzamiento al este. Izquierda: Cortes realizados por López and Barrero (2002), “Sec2. H-12 Bucaramanga” corresponde con el segmento del corte Puerto Wilches hasta Arauca correspondiente al cuadrángulo H12. El “Sec8e” corresponde con el segmento del corte Puerto Carare hasta Paz de Aripuro correspondiente a la plancha geológica 135 de San Gil. Derecha: Cortes geológicos de Julivert (1958) mostrando a la Falla del Suárez como una fractura de buzamiento al este.

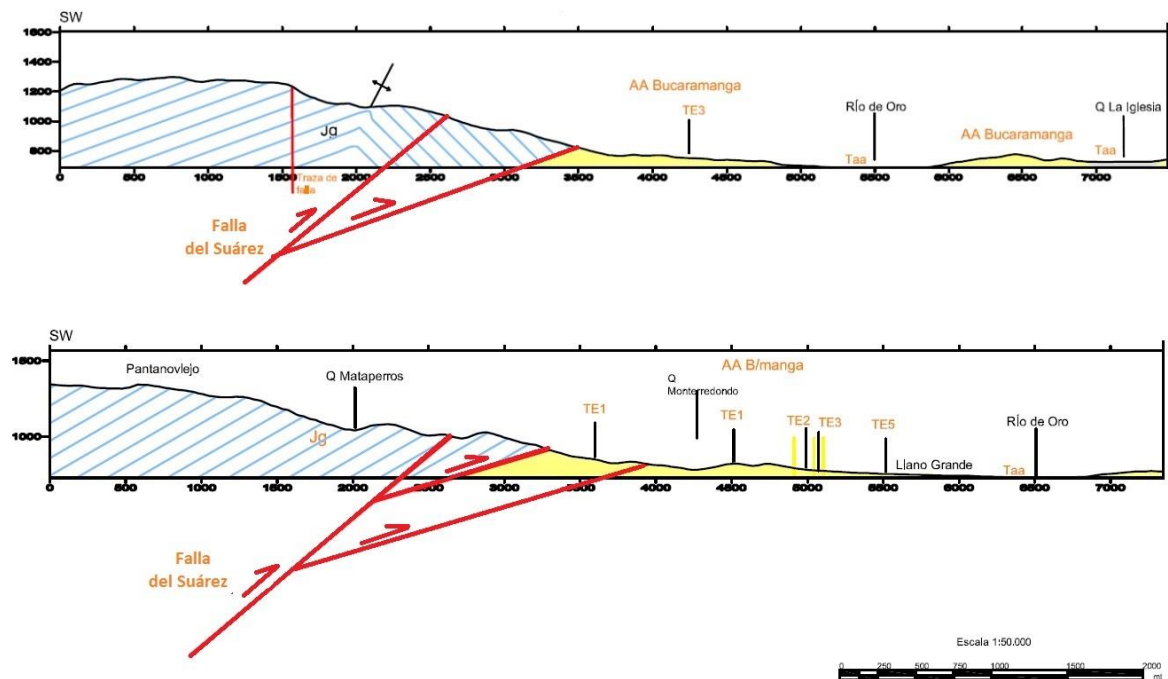


Fuente: López and Barrero (2002) y Julivert (1958). Modificada por los autores.

En contraste a los anteriores estudios, varios autores describen a la Falla del Suárez como una estructura inversa, entre los cuales se encuentra Londoño (1982), quien la define como una estructura inversa de alto ángulo con desplazamiento lateral izquierdo. Igualmente, Pulido (1979) la clasifica como una falla inversa que levanta su bloque oeste, con un comportamiento cambiante reflejado en el buzamiento de los estratos que varían

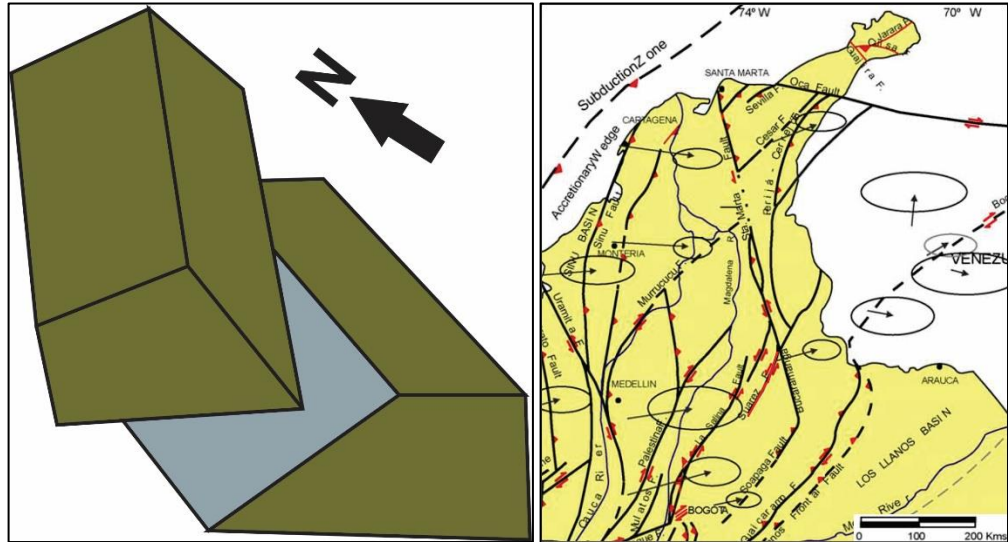
de inclinaciones de 60° al norte hasta 20° en el sur. También en algunos estudios más recientes, autores como París *et al.* (2000) y Diederix *et al.* (2008) le atribuyen a la Falla del Suárez un comportamiento inverso-sinistral (Figura 5). Por otra parte, Díaz y Suárez (1998) la caracterizan como una falla de comportamiento normal hacia el sector sur e inverso hacia el sector norte, y Acosta *et al.* (2004) la define como una estructura de movimiento lateral izquierdo, mediante datos de lineaciones (Figura 6).

Figura 5. Cortes estructurales donde se muestra a la Falla del Suárez actuando sobre rocas del Jurásico (Formación Girón “Jg”) y depósitos Cuaternarios (Abanico Aluvial de Bucaramanga, “AA”). La Falla del Suárez es interpretada como una estructura inversa. Los cortes originales presentan mayor longitud, sin embargo, por razones de espacio, solo se muestra la zona de los cortes donde se evidencia la acción de la Falla del Suárez.



Fuente: Diederix *et al.* (2008). Modificada por los autores.

Figura 6. Modelos planteados para la Falla del Suárez. Izquierda: Modelo para la Falla del Suárez mostrando un comportamiento normal hacia el sector sur e inverso hacia el sector norte. Derecha: Mapa estructural mostrando un movimiento lateral izquierdo de la Falla del Suárez.



Fuente: Díaz y Suárez (1998) y Acosta *et al.* (2004). Modificada por los autores.

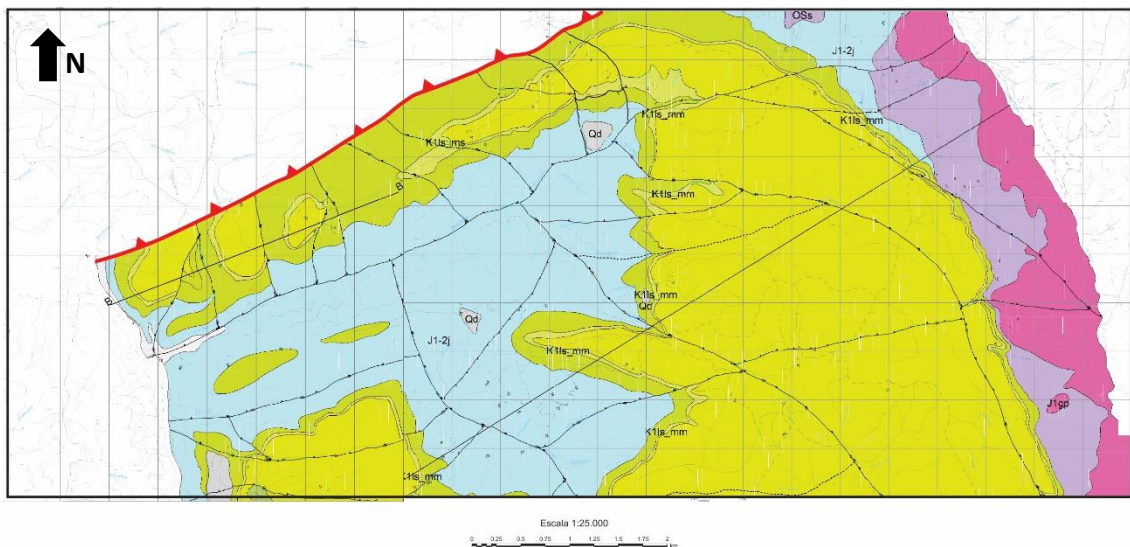
En cuanto a la actividad reciente de la Falla del Suárez, algunos autores reportan actividad cuaternaria de esta estructura sin mayores pruebas para sustentarlo (Page, 1986 en Diederix *et al.*, 2008; Julivert, 1958; Paris y Romero, 1993; Paris y Sarria, 1988), planteándose que su velocidad vertical no sobrepasa 0.1 mm/año (Paris y Sarria, 1988).

5.2. LINEAMIENTO AL NORTE DE LA MESA DE LOS SANTOS

Son pocos los autores que han estudiado esta estructura, localizada al norte de la Mesa de Los Santos. Su trazo presenta una dirección ENE-OSO y se extiende por el Valle de la quebrada Los Montes.

Los trabajos más destacados son los de Vargas y Niño (1992) y Pinto *et al.* (2007), quienes difieren en sus interpretaciones sobre esta estructura a la que denominan Falla Los Santos. Vargas y Niño (1992) proponen y describen a La Falla Los Santos como una estructura localizadas en el bloque yacente de las Fallas del Suárez y Bucaramanga, la cual presenta una cinemática normal y de inclinación al NO (Figura 1). Por otra parte, Pinto *et al.* (2007) la describe como una estructura inversa de alto ángulo con componente sinistral (Figura 7).

Figura 7. Mapa de la Mesa de los Santos en donde se muestra al Lineamiento de la Mesa los Santos (Falla Los Santos) como una estructura inversa de alto ángulo.



Fuente: Pinto *et al.* (2007). Modificada por los autores

6. MARCO GEOLÓGICO

El bloque Norandino, conformado por los Andes del Ecuador, Venezuela y Colombia, se localiza en el margen noroccidental de Sur América. Sus características han sido estudiadas con base en modelamientos litosféricos, análisis de campo e imágenes de tomografía, arrojando como resultados una diferenciación de este segmento de lo que se conoce como La Cordillera de los Andes (Cediel *et al.*, 2003). Los Andes de Colombia constan de tres cadenas montañosas denominadas Cordillera Occidental (CO), Cordillera Central (CC) y Cordillera Oriental (CO_r), separadas por los valles de los ríos Cauca-Patía y Magdalena, respectivamente (Cediel *et al.*, 2003; Cooper *et al.*, 1995; Toro *et al.*, 2004; Toussaint, 1993). Estas tres cordilleras son el resultado de la interacción entre las Placas Nazca y Caribe, de afinidad oceánica y cuya tasa de convergencia es de 6-8 cm/año y 1-2 cm/año (Schneider *et al.*, 1987; Toro *et al.*, 2004) respectivamente, y la placa Sur Americana, de afinidad continental.

Durante el Cretácico tardío - Paleógeno temprano, la placa Caribe empezó su movimiento relativo hacia Sur América, generando una zona de subducción que conllevó al levantamiento de la Cordillera Central, con un patrón de propagación hacia el norte; en adición, un terreno oceánico al parecer parte de la misma placa, fue acrecionado a la margen continental de Colombia, generando lo que se conoce hoy en día como la Cordillera Occidental (Toro *et al.*, 2004; Aspden and McCourt, 1986 en Moreno *et al.*, 2011). A finales del Maastrichtiano-Paleoceno medio, ésta acreción generó el basculamiento de la CC, y a su vez favoreció la reactivación inversa del límite oeste de la antigua cuenca extensional Cretácica, dando inicio al levantamiento de la CO_r (Bayona *et al.*, 2013).

Actualmente, la Cordillera Oriental es definida como un cinturón plegado y fallado de doble vergencia, conformada por rocas metamórficas pertenecientes a los macizos de Santander, Floresta y Garzón (Ward *et al.*, 1973; Goldsmith *et al.*, 1971; Mora *et al.*, 2006; Ulloa *et al.*, 2003) y rocas sedimentarias producto del depósito de sedimentos de diferentes fuentes, desde inicios del Triásico hasta el Paleógeno (Royero y Clavijo, 2001; Ulloa *et al.*, 2003; Ward *et al.*, 1973). Su límite oeste es definido por fallas de empuje y sistemas plegados que separan a la Cordillera Oriental del depocentro conocido como Valle del Magdalena (Moreno *et al.*, 2011). El límite este está conformado por el sistema de fallas de Guaicaramo que la separan del depocentro oriental conformado por el piedemonte llanero y la cuenca de los Llanos (Bayona *et al.*, 2013).

6.1. EVOLUCIÓN DE LA CORDILLERA ORIENTAL (CO) Y EL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA (VMM)

La CO ha evolucionado a partir de la época de extensión registrada durante el Jurásico Tardío – Cretácico temprano (Cooper *et al.*, 1995; Sarmiento *et al.*, 2006), donde se generaron cuencas limitadas por fallas normales, que sirvieron como espacios para la acumulación de los sedimentos que dieron paso a la formación de unidades como las Formaciones Girón, La Rusia, Los Santos y Arcabuco. A partir del Cretácico temprano se dio el inicio de la sedimentación marina – marina somera (Mora *et al.*, 2006; Sarmiento *et al.*, 2006), la cual es evidenciada en las Formaciones Rosablanca, Paja, La Luna, entre otras. Para el Cretácico tardío se han registrado dos eventos importantes: El primero corresponde con una subsidencia que ha sido explicada mediante el método de McKenzie (1978), basándose en el adelgazamiento de la litosfera y pequeñas intrusiones basálticas que se encuentran cortando las unidades del Cretácico temprano. El segundo es el movimiento de la placa Caribe, que dio paso a la formación de una zona de subducción en el margen occidental de Colombia, generando el levantamiento de la Cordillera Central (Toro *et al.*, 2004; Bayona *et al.*, 2013). Es así como la acumulación de los sedimentos del

Paleoceno se puede explicar por la subsidencia tectónica y la gran cantidad de sedimentos relacionados al levantamiento de la CC; mientras que el engrosamiento de las capas del Eoceno medio al Neógeno durante la erosión de la CC son consistentes con la subsidencia provocada por la carga de la CO_r (Gómez *et al.*, 2005).

El Valle Medio del Magdalena (VMM) documenta el levantamiento de la CC y la posterior transferencia de la deformación hacia la CO_r durante el Cretácico tardío al Eoceno temprano, de una manera consistente con la evolución del margen Andino. La acomodación del VMM está directamente relacionada a la evolución de sus orógenos adyacentes (CC y CO_r) debido a que las cargas de la corteza, producidas por la actividad tectónica causan subsidencia (Gómez *et al.*, 2005). Cambios en la dirección de paleocorrientes (Caballero *et al.*, 2010; Gómez *et al.*, 2005), junto con datos de proveniencia indican una fuente de sedimento de la CC para el VMM en las Formaciones La Paz y Esmeraldas, de la CO_r para las Formaciones Mugrosa y Colorado, y de ambas para la Formación Real (Mioceno tardío). Lo anterior, permite proponer el inicio del levantamiento de la CO_r durante el Eoceno tardío - Oligoceno temprano (Caballero *et al.*, 2010; Cooper *et al.*, 1995; Mora *et al.*, 2006; Toro *et al.*, 2004), y la consiguiente transformación del VMM desde una cuenca de antepaís a una cuenca intermontaña (Gómez *et al.*, 2005). El VMM probablemente aún experimenta un ajuste flexural, debido a la continuidad de la actividad tectónica de la CO_r, la cual ha sido inferida por la existencia de estratos de crecimiento cuaternarios (Julivert, 1958) y de sismicidad superficial (Taboada *et al.*, 2000).

7. MARCO TEÓRICO

A continuación, se describen los métodos utilizados para el tratamiento de los datos recolectados, así como conceptos que se enmarcan en un contexto estructural para un entendimiento más claro del trabajo realizado.

7.1. CONCEPTOS GENERALES

Se revisó y analizó la información obtenida durante el procesamiento de los datos; se realizó la correlación de los resultados por la ubicación de los mismos, localizándolos en los mapas, con el fin de relacionar los resultados obtenidos con las estructuras presentes, y así solucionar el problema inicial, cumpliendo con los objetivos para el proyecto.

7.1.1. Falla

Las fallas son discontinuidades o fracturas que separan bloques y permiten la liberación de energía, conllevando a movimientos relativos de los diferentes bloques, mostrando así, un contraste en las diferentes características de ambos lados de dichas fracturas, tales como, cambios en litología o morfología. El contraste en las características es el mayor indicador para reconocer y localizar zonas de fallas (Angelier, 1994).

7.1.2. Esfuerzo (Stress)

El esfuerzo es definido como la fuerza por unidad de área que le es aplicada a un objeto. Dicha fuerza puede ser medida teniendo en cuenta los diferentes efectos que ha causado en el objeto, si se conoce la dirección en la que actúa y su magnitud (Price and Cosgrove, 1990). Los análisis de esfuerzos se relacionan con análisis dinámicos. Estos análisis deben ser utilizados solamente cuando se consideran modelos matemáticos, cuando se estudia

la génesis de estructuras o cuando las fuerzas son medibles, como por ejemplo, en experimentos de laboratorios (Marrett and Peacock, 1999).

7.1.3. Deformación (Strain)

La deformación se relaciona con los cambios que sufre un objeto a partir de los esfuerzos o movimientos que son realizados sobre el mismo (Price and Cosgrove, 1990). Los cambios son medidos a partir de las características originales del objeto. Los análisis de esfuerzos son relacionados con análisis cinemáticos y pueden estar representados en estructuras observables (Marrett and Peacock, 1999).

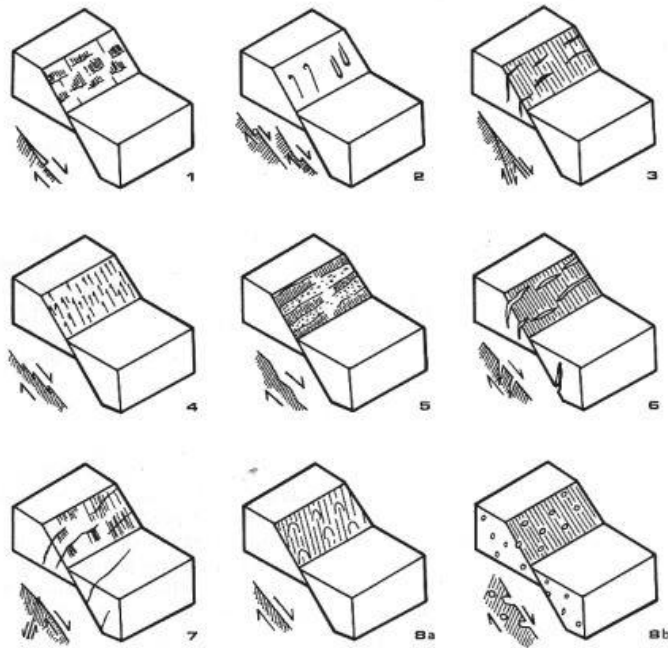
7.2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

7.2.1. Indicadores Cinemáticos

Los indicadores cinemáticos corresponden a una variedad de criterios que son utilizados para identificar el sentido de movimiento de una falla. Entre los principales indicadores se presentan los escalones minerales, las estrías de falla y las fracturas Riedel (R) y Antiriedel (R') (Figura 8).

Además de los indicadores, las relaciones de campo, tales como pliegues de arrastre, diques o venas desplazadas, son estructuras que en conjunto, pueden ser utilizadas para definir la cinemática de una falla.

Figura 8. Criterios e indicadores que pueden ser utilizados para determinar el sentido de movimiento de una falla. Los ejemplos son mostrados para fallas normales, pero los criterios son válidos para cualquier orientación de la falla. (1) Escalones Minerales; (2) Marcas de herramientas tectónicas; (3) Cizallas Riedel; (4) Crestas estilolíticas; (5) Facetas pulidas o rugosas; (6) *Tension gashes*; (7) Fracturas de cizallas conjugadas; (8a) Marcas parabólicas; (8b) burbujas deformadas en lavas.



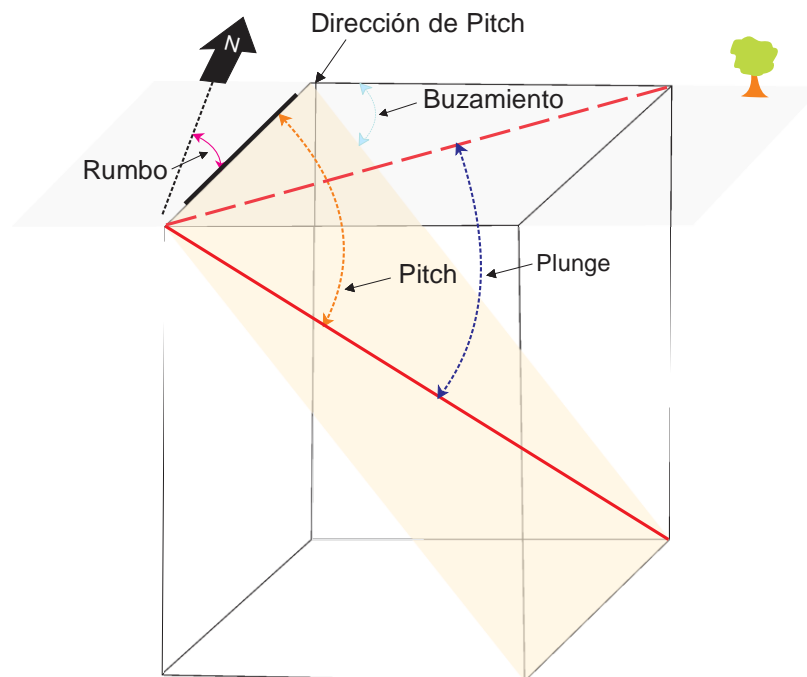
Fuente: Angelier (1994).

7.2.2. Medida de datos de deslizamiento de fallas

A continuación, se describen los parámetros que son tomados en campo para definir el comportamiento de una falla, utilizando principalmente las estrías; estos datos, junto con otros indicadores, como pueden ser los riedel y antiriedel, muestran el movimiento de la misma (Figura 9).

- Rumbo: Angulo presente entre la línea perpendicular a la dirección de máxima inclinación y el norte.
- Buzamiento: Angulo que forma la línea de máxima inclinación con un plano horizontal.
- Pitch: Angulo entre la línea de estría y el rumbo del plano, medido sobre este último.
- Dirección de Pitch: Cuadrante hacia donde apunta la línea de pitch, el cual debe corresponder con uno de los dos cuadrantes de la línea de rumbo.
- Plunge: Angulo entre la línea de estría y su proyección en un plano horizontal.

Figura 9. Datos que pueden ser tomados a partir del producto del deslizamiento de fallas. El plano de la falla corresponde con el plano inclinado de color naranja claro; La línea roja (inclinada) corresponde a una estría; la línea roja que se observa sobre el plano superior, corresponde a la proyección de la estría.



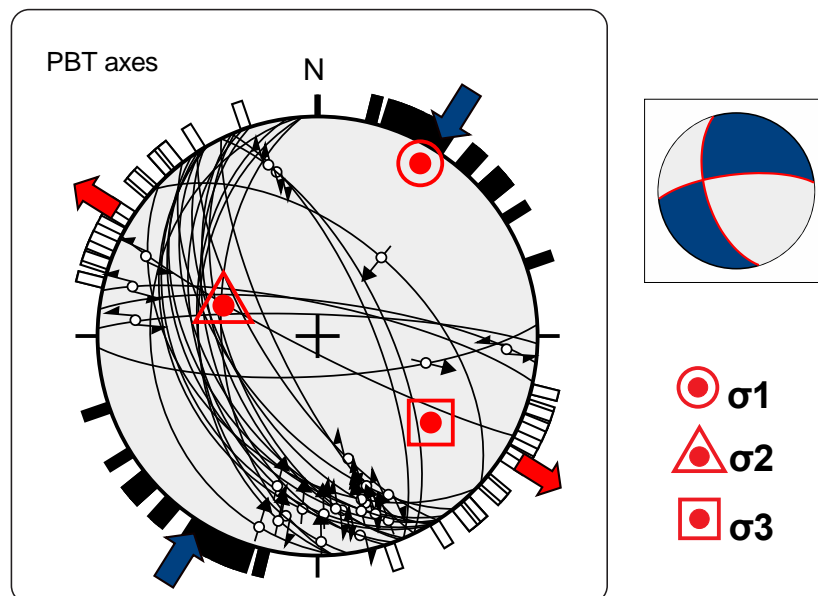
Fuente: Cetina y Patiño (2013). Modificada por los autores.

7.3. METODOS DE ANÁLISIS PARA DATOS ESTRUCTURALES

7.3.1. Método PBT

Este método tiene en cuenta un plano, definido como plano de movimiento, el cual se ubica perpendicular al plano de falla e incluye la dirección de deslizamiento. Además, se asume que el plano contiene el esfuerzo S_1 y S_3 , mientras la línea normal a las estrías es definida como S_2 (Burg, 2014). A partir de lo anterior, el método calcula para cada plano de falla un eje de compresión (P), un eje de extensión (T) y un eje intermedio (B), asumiendo una equivalencia de los tensores de Presión y Tensión con los esfuerzos máximos y mínimos de compresión (σ_1 y σ_3)(Figura 10).

Figura 10. Resultados a partir del procesamiento de datos con el método PBT en el software Win Tensor 5.8.4 Las flechas y bandas azules corresponden al eje de compresión y las flechas rojas y bandas claras (imagen derecha), corresponden con el eje de tensión.



7.3.2. Método de diedros rectos

En este método se trabaja con cada uno de los planos de falla por separado. Se basa en limitar para cada falla las zonas del espacio compatibles en compresión y en tensión, superponiendo los campos en la proyección estereográfica. Dependiendo del sentido de movimiento de la falla, un par de cuadrantes opuestos delimita la posible orientación del esfuerzo de compresión y extensión (σ_1 y σ_3).

7.3.3. Circulo de MOHR

El círculo de Mohr es la representación en dos dimensiones de los esfuerzos que actúan sobre un plano, ya sea de tipo uniaxial ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$), biaxial ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 = 0$) o triaxial ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). En este diagrama, los esfuerzos normal (σ_n) y de cizalla (σ_s) son mostrados en el eje horizontal y vertical, respectivamente (Figura 11). Cuando el círculo se grafica en dos dimensiones, en el eje horizontal solo se ubican los esfuerzos máximos y mínimos principales (σ_1 y σ_3); la diferencia entre estos dos puntos define el diámetro del círculo (Fossen, 2010).

El criterio de fractura de Coulomb, indica el esfuerzo que se requiere para que una roca sufra fracturamiento, lo cual depende de los esfuerzos normales y de cizalla que actúan sobre la misma (Fossen, 2010). Este criterio, se basa en la siguiente ecuación, la cual cumple la ecuación de una recta que se genera tangente al círculo de Mohr (Figura 12).

$$\tau = C_o + \mu\sigma$$

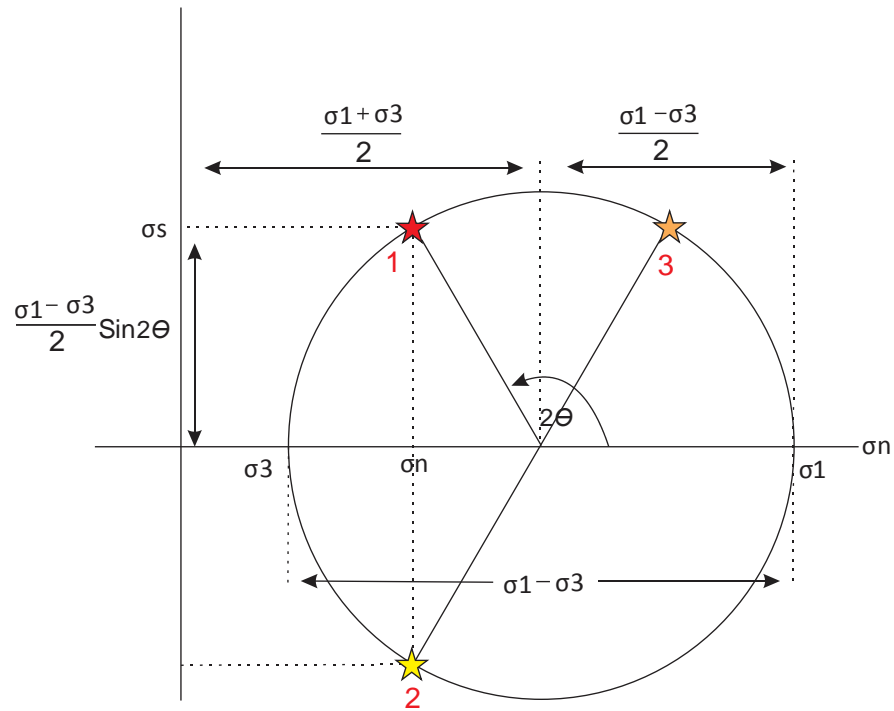
Dónde:

τ y σ corresponden a la componente de cizalla y la normal que actúa sobre el plano

C_o es la resistencia cohesiva

y, μ es el coeficiente de fricción.

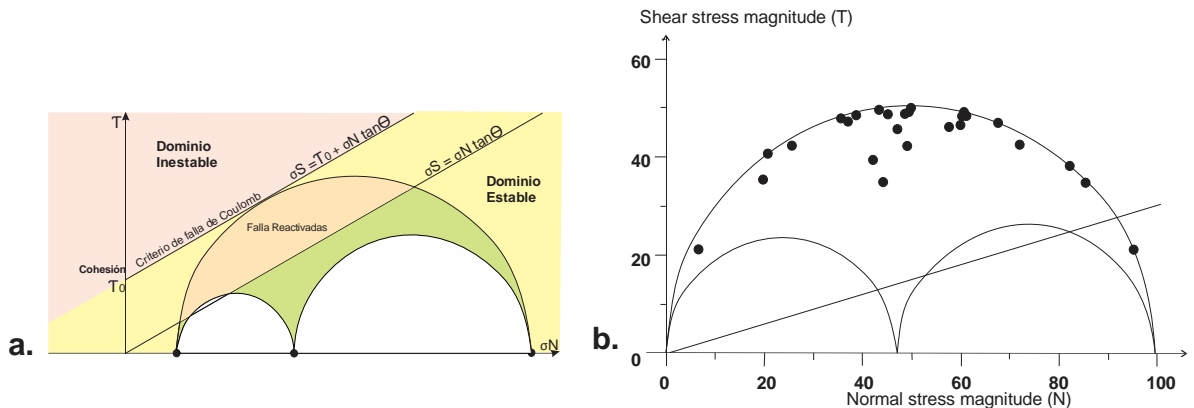
Figura 11. Circulo de Mohr. Se muestra el eje horizontal y vertical correspondiente a los esfuerzos Normales y de Cizalla. Las estrellas representan planos donde el 3 corresponde al plano complementario del 1 y, además, corresponde con un plano perpendicular al plano 2, separados por 180° . ϑ es el ángulo entre el plano de falla y el esfuerzo máximo σ_1 .



Fuente: Fossen (2010).

A partir de la combinación entre el círculo de Mohr y la envolvente de Coulomb, se realiza la discriminación de grupos de datos de fallas. Dependiendo de la ubicación de los puntos sobre el círculo de Mohr, se realiza la interpretación de los mismos; aquellos puntos que se ubican cerca de la línea de criterio de falla, son identificados como datos relacionados a un mismo tensor, definiéndolos como datos de fallas neorformadas.

Figura 12. Representación del círculo de Mohr junto a la envolvente de Coulomb. **a.** muestra las rectas que dividen los datos de fallas neoformadas, reactivadas y estables; **b.** muestra un ejemplo a partir de los datos analizados en el software WinTensor. Se observa un solo dato estable, mientras el resto de la población se encuentra en la región de datos reactivados.

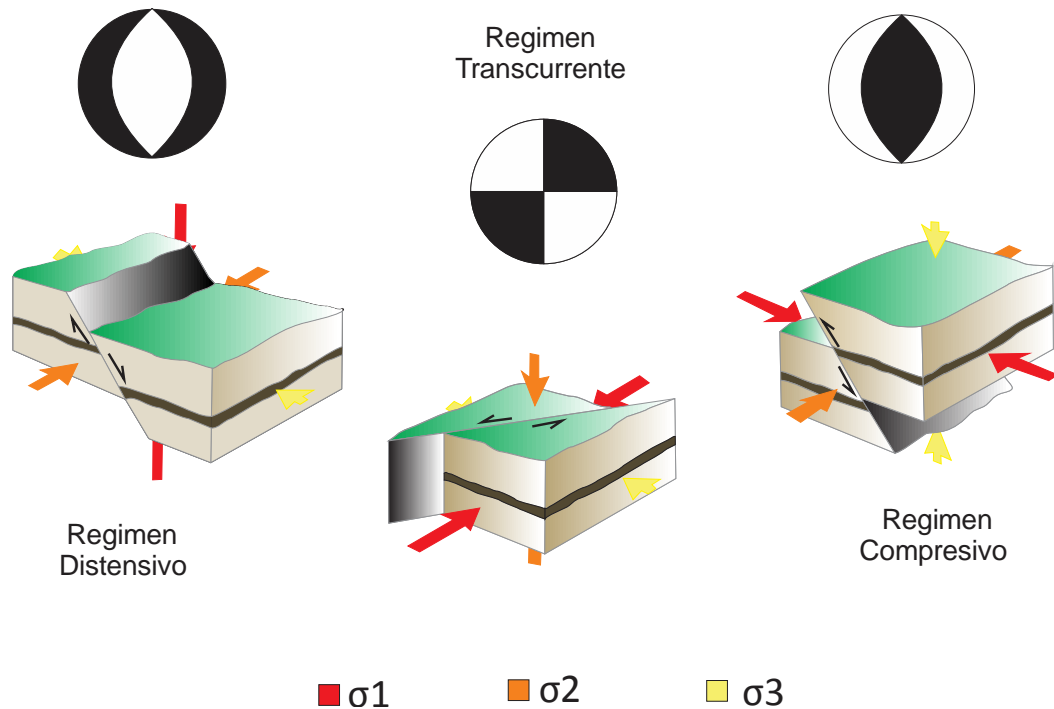


Fuente: Burg (2011). Modificada por los autores.

7.4. REGÍMENES TECTÓNICOS

Las relaciones entre los límites de placas tectónicas (convergente, divergente y transformante), llevan al desarrollo de estructuras en la superficie de la tierra. Existen tres regímenes que determinan el patrón de deformación de la litosfera; el régimen de fallas normales, el régimen de fallas inversas y el régimen de fallas de rumbo y transformantes (Figura 13). Aunque las diferentes interacciones de las placas tectónicas desarrollan los regímenes en sitios específicos, existen regiones donde se presentan los tres al mismo tiempo; esto, debido a que el eje máximo de compresión se orienta horizontalmente, implicando un régimen de cabalgamiento o de rumbo en gran parte de los continentes (Fossen, 2010).

Figura 13. Se muestran los tres regímenes tectónicos definidos según la ley de Anderson; régimen distensivo, régimen compresivo y régimen transcurrente, donde $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.



Fuente: Fossen (2010). Modificado por los autores.

7.4.1. Régimen compresivo

Se presenta particularmente en límites de placas convergentes y zonas orogénicas. Se caracteriza por la generación de sistemas orogénicos, cinturones plegados y fallados (Fossen, 2010) (Figura 13). En este régimen el esfuerzo máximo (σ_1) y el intermedio (σ_2) se orientan horizontalmente, mientras el esfuerzo mínimo (σ_3) se orienta de manera vertical.

7.4.2. Régimen distensivo

Se presenta a lo largo de placas divergentes, pero se ve más pronunciado en áreas de *rifting* y de extensión continental. Se caracteriza por el desarrollo de fallas normales

(Figura 13) (Fossen, 2010). El modelo más popular para explicar la extensión se relaciona con el colapso gravitacional de la topografía en áreas muy altas, fenómeno conocido como subsidencia.

7.4.3. Régimen transcurrente

Se genera en áreas donde la presencia de fallas de rumbo es significativa (Figura 13). Estas fallas se forman cuando partes individuales de la corteza se mueven a diferentes velocidades a lo largo de la superficie de la tierra (Fossen, 2010). Este tipo de fallas se dividen en: fallas transformantes (que unen límites de placas), fallas transcurrentes (las cuales se ubican en zonas intracontinentales) y las fallas de transferencia (que se encargan de transferir la deformación entre dos fallas normales o inversas que interfieren en sus terminaciones) (Osorio, 2016).

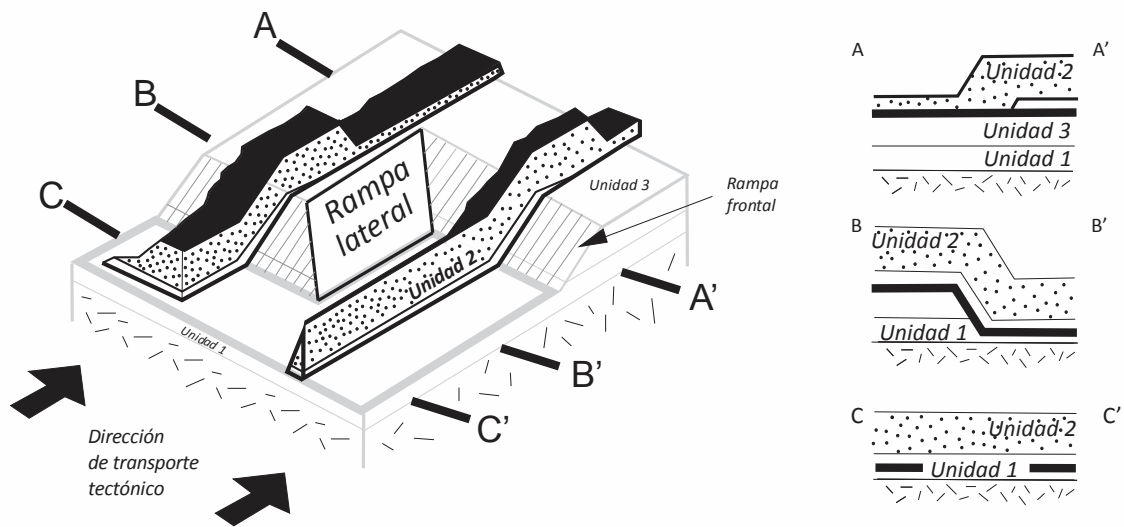
7.5. ZONAS TRANSVERSALES (ZT)

Son áreas que comprenden diferentes estructuras como rampas laterales, rampas oblicuas, fallas transversales, zonas de acomodación y zonas de transferencia para cinturones plegados. En los mapas, las zonas transversales son representadas por bandas gruesas que enmarcan los diferentes conectores laterales (Thomas, 1990).

Las zonas transversales están compuestas por conectores laterales como fallas transversales o rampas laterales, y además, son definidas por fallas de rumbo, las cuales, presentan su dirección paralela o ligeramente oblicua a la dirección de extensión; siendo estas estructuras las que facilitan el traspaso de deformación entre diferentes dominios (Fauld and Varga, 1998; Thomas, 1990). Las rampas laterales se encargan de conectar rampas frontales, las cuales, cuando son observadas en su perfil estructural, muestran que

sus pliegues asociados terminan abruptamente (en lugar de gradualmente) y es en esas terminaciones donde las rampas laterales se encargan de transferir la energía a lo largo del rumbo (Figura 14) (Bayona et al., 2003).

Figura 14. Bloque diagrama esquemático mostrando una posible explicación de la terminación lateral de estratos debido a la acción de una rampa lateral, transversal a la dirección del transporte tectónico; la rampa lateral es la encargada del traspaso de la deformación entre las mismas.



Fuente: Bayona et al. (2003).

8. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

8.1. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Además de la presencia de las estructuras principales de esta investigación y las cuales ya han sido mencionadas y descritas anteriormente (Falla del Suárez y lineamiento localizado al norte de la Mesa de Los Santos), en la zona se destaca la presencia de La Falla Bucaramanga, una de las principales características estructurales en Colombia. Tiene una dirección aproximada N20°O, cuyo trazo se expresa claramente en imágenes de satélites y fotografías aéreas, y por la ocurrencia de facetas triangulares, lineamientos, drenajes capturados, lagunas de falla y lomos de obturación (Royero y Clavijo, 2001). La Falla Bucaramanga ha sido definida hacia la zona de Bucaramanga como una estructura de rumbo sinistral con movimiento inverso en la vertical (Paris *et al.*, 2000; Diederix *et al.*, 2008). Sin embargo, autores como Campbell (1965) en Royero y Clavijo (2001), y Toro (1990) solo describen el movimiento de rumbo sinistral de la estructura, sin mostrar evidencias de movimientos en la vertical.

8.2. ESTRATIGRAFÍA

La zona de estudio se caracteriza por la presencia de rocas de diferentes edades, lo que permite obtener mayor información acerca de las fallas que son estudiadas en cuanto a las unidades que afectan y el salto estratigráfico de las mismas. Así, en el área estudiada se tuvo control estratigráfico de cuatro unidades Mesozoicas conocidas como las Formaciones Jordan (Jj), Girón (Jg), Los Santos (K1Ls) y Rosablanca (K1r) (Ward *et al.*, 1973; Mojica y Kammer, 1995; Royero y Clavijo, 2001, Caballero *et al.*, 2010). Además, se recolectó información correspondiente a depósitos cuaternarios pertenecientes a la Formación Bucaramanga.

Las unidades serán descritas a continuación, mostrando las características que les han sido asignadas por otros autores y las observadas en el área de estudio; esto, con el fin de no repetir información durante el documento.

Figura 15. Columna estratigráfica del Valle Medio del Magdalena. Se muestran las unidades que fueron controladas a lo largo de la fase de campo (Formaciones Jordán, Girón, Los Santos y Rosablanca) y que son descritas en este capítulo (Periodo Jurásico y Cretácico).

PERIODO	ÉPOCA / EDAD	FORMACIÓN	LITOLOGÍA	AMBIENTE DE DEPOSITO	
CUATERNARIO		MESA			
CENOZÓICO	NEÓGENO	REAL		CONTINENTAL	
		COLORADO			
	PALEÓGENO	MUGROSA			
		ESMERALDAS - LA PAZ			
		LISAMA			
CRETÁCICO	Maastrichtiano			TRANCISIONAL (Pantanos)	
	Campaniano	UMIR		MARINO (Depósitos de frente deltaico)	
		Santoniano			
	Coniaciano				
	Turoniano	LA LUNA		MARINO (Plataforma externa a media)	
	Cenomaniano				
	INFERIOR	Albiano	SIMITÍ		MARINO (Plataforma interna a media)
			TABLAZO		MARINO (Plataforma interna a media Zona submareal)
		Aptiano			
		Barremiano	PAJA		MARINO (Plataforma media, dominada por tormentas hacia el tope)
Hauterviano					
JURÁSICO	Valanginiano	ROSABLANCA		MARINO (Plataforma calcárea, llanuras costeras influenciadas por mareas, tipo Sabka)	
	Berriasiano	CUMBRE			
		ARCABUCO - LOS SANTOS		CONTINENTAL	
		GIRÓN		CONTINENTAL (Sistemas fluviales)	
		JORDÁN		CONTINENTAL	

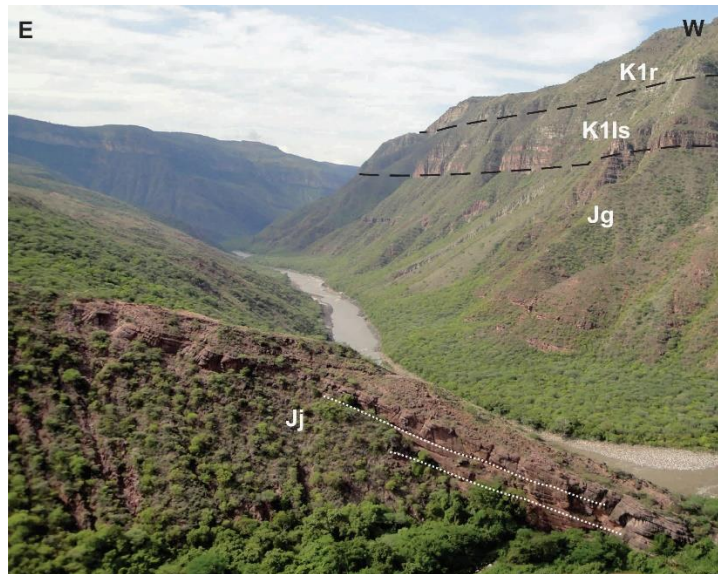
Fuente: Rolón (2004). Modificada por los autores.

8.2.1. Formación Jordán (Jj)

La Formación Jordán se encuentra ubicada al sureste de la zona de estudio, hacia la Mesa de Los Santos, en los valle de las Quebradas Honda y Las Lajas. La unidad ha sido descrita como una secuencia de rocas de ambiente continental vulcanoclastico, con rocas como areniscas de grano grueso y fino, así como shales y presencia de tobas félsicas. Su espesor varía entre los 300 y 600 metros (Ward *et al.*, 1973).

La Formación Jordán infrayace en discontinuidad estratigráfica a la Formación Girón (Cediel, 1968), y suprayace concordantemente a la Formación Bocas (Royero y Clavijo, 2001).

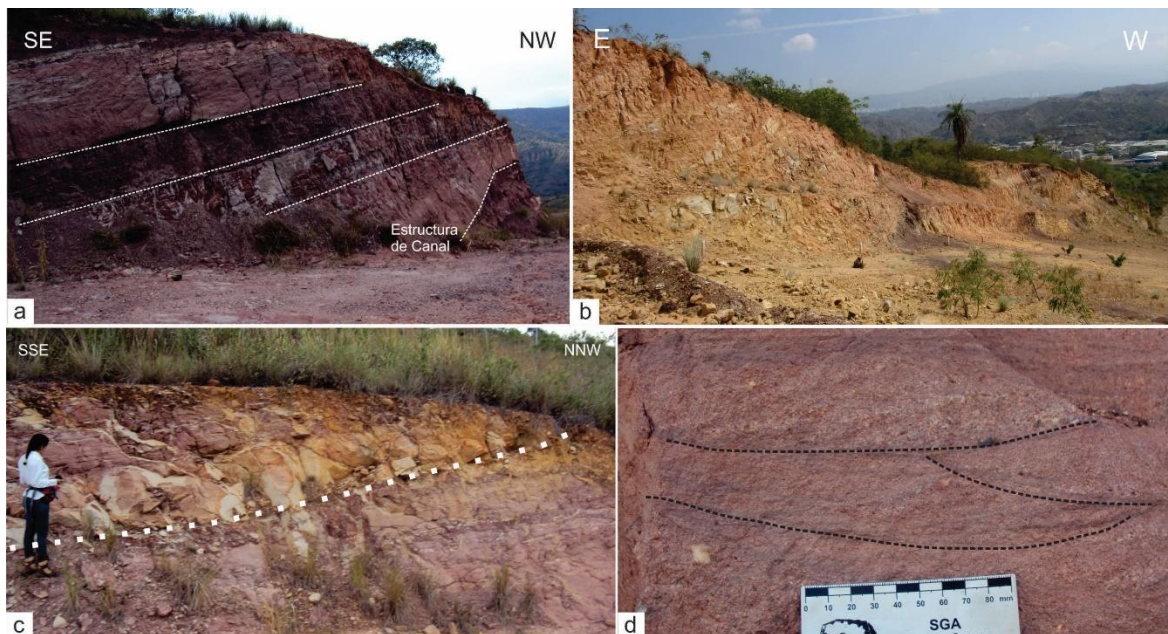
Figura 16. Afloramiento de la Formación Jordán (Jj) en el Cañón del Río Sogamoso. Se observan al fondo los contactos entre las Formaciones Rosablanca (K1r), Los Santos (K1ls) y Girón (Jg).



8.2.2. Formación Girón (Jg)

La Formación Girón es la unidad de mayor extensión en la zona de estudio y por lo tanto, la unidad con mayor cobertura y control de sus características. Esta formación presenta una secuencia de rocas depositadas en un ambiente continental (Figura 15 y Figura 17), presentando como principal característica el color rojo de las rocas, indicadoras de procesos de oxidación.

Figura 17. Afloramientos de la Formación Girón en la zona de estudio. a) Capas gruesas de areniscas conglomeráticas intercaladas con capas de areniscas lodosas; se observa en la parte inferior una estructura de canal. b) Afloramiento altamente diaclasado en el que se presenta intercalación de areniscas y esporádicas capas de lodolitas, localizado en el municipio de Girón. c) Estructura de canal en un afloramiento sobre la vía al proyecto Relleno Sanitario Parque Chocoa. d) Laminación cruzada en estratos de areniscas conglomeráticas de grano grueso.



La sección tipo de esta unidad fue asignada por Cediell (1968) en el Río Lebrija, donde el autor midió un total de 4.650 metros. A lo largo de la vía que conduce al proyecto “Construcción del relleno sanitario parque Chocoa”, localizado en la vereda Chocoa, se realizó el control de la Formación Girón y se generó una columna estratigráfica (Ver Figura 18 y ANEXO A), donde se observa de forma general las características de una sección de aproximadamente 350 metros.

La Formación Girón reposa en discontinuidad estratigráfica sobre la Formación Jordán e infrayace concordantemente a la Formación Los Santos (Royero y Clavijo, 2001).

Figura 18. Columna estratigráfica de la Formación Girón (Jg) levantada a lo largo de la vía que conduce al proyecto “Construcción del relleno sanitario parque Chocoa”. Ver ANEXO A.



8.2.3. Formación Los Santos (K1Ls)

La Formación Los Santos aflora hacia el sureste de la zona, en la Mesa de Los Santos, y hacia el Oeste, por las vías que desde Girón conducen a los municipios de Zapatoaca y Betulia. La Formación Los Santos ha sido asociada a un ambiente continental fluvial, evidenciado en las rocas que la constituyen; areniscas conglomeráticas, lodolitas rojas - grisáceas y cuarzoareniscas, con estratificación cruzada (Royero y Clavijo, 2001). En el área de estudio, las rocas de la Formación Los Santos son observadas como areniscas blancas dispuestas en capas medias a gruesas, las cuales presentan un contenido de cuarzo de más del 95%, intercaladas con algunos niveles de lodolitas rojizas a grisáceas (Figura 19).

Figura 19. Afloramientos pertenecientes a la Formación Los Santos. a) Capas horizontales de areniscas ubicadas en la Mesa de los Santos. B y C) Afloramientos de areniscas cuarzosas vía Girón – Betulia, se observan algunas capas verticalizadas.



En la zona de estudio, la Formación Los Santos se presenta suprayaciendo a la formación Girón (Figura 20) e infrayaciendo a la Formación Rosablanca.

Figura 20. Contacto entre las Formaciones Girón y Los Santos. Fotografía tomada en la Vereda Chocoa (Municipio de Girón) al margen izquierdo de la quebrada los Montes.



8.2.4. Formación Rosablanca (K1r)

La Formación Rosablanca se presenta en la zona sur del área de estudio. La unidad ha sido asociada a un ambiente deposicional marino, evidenciado por la presencia de capas de calizas con minerales como yeso y algunas lodolitas calcáreas (Cardozo y Ramirez, 1985). El espesor reportado para esta unidad varía entre 150 y 425 metros. En su contacto superior se presenta la Formación Paja y en su contacto inferior la Formación Los Santos (Figura 15).

8.2.5. Formación Bucaramanga

Esta unidad se localiza al norte de la zona de estudio y corresponde con un depósito de edad Cuaternaria relacionado morfológicamente a un abanico aluvial erosionado (Hubach, 1952). La Formación Bucaramanga está compuesta por cuatro miembros definidos por Hubach (1952), De Porta (1958) y Vargas y Niño (1992) y nombrados de base a techo como: miembro Órganos (Qbo), miembro Finos (Qbf), miembro Gravoso (Qbg) y miembro Limos Rojos (Qblr).

Durante la fase de campo, la información de depósitos cuaternarios corresponde principalmente al Miembro Órganos, y por lo tanto, solo se realizará la descripción de este mismo.

Miembro Órganos (Qbo): encontrado en contacto con la Formación Girón (Figura 21), contacto que en algunos sectores fue guía para definir la acción de la Falla del Suárez. Se observa distribuido como un depósito de diferentes tipos de roca, con colores naranjas y amarillos claros en su meteorización. Se observan fragmentos de roca gruesos, algunos de aspecto conglomerático, alternados con capas y lentes limo-arenosos (Figura 22).

En cuanto a los depósitos más recientes, relacionados a acciones fluviales, fluviotorrenciales o antrópicas, no hubo mayor control de sus características, por lo tanto, no son descritos en este trabajo; sin embargo, durante la fase inicial del proyecto fueron estudiadas con base en la información descrita por autores como Diederix *et al.* (2009), y quienes hicieron parte del proyecto de INGEOMINAS (2001).

Figura 21. Contacto entre la Formación Girón (Jg) y el miembro Órganos (Qbo), perteneciente a la Formación Bucaramanga. Fotografía tomada sobre la vía hacia la Vereda Soracá (Municipio de Girón).



Figura 22. Afloramiento perteneciente al miembro Organos (Qbo), miembro inferior de la Formación Bucaramanga. Se observan los depósitos de rocas de tamaños gruesos intercalados con algunas rocas de menor tamaño. Fotografía tomada en la vía que desde Girón conduce al municipio de Zapatoca.



9. METODOLOGÍA

Para cumplir los objetivos planteados al inicio del presente trabajo de investigación se siguieron una serie de actividades divididas en 4 fases principales que son descritas a continuación:

9.1. FASE INICIAL

Durante esta fase se identificó el problema a solucionar en la investigación, planteando los objetivos del trabajo. Seguidamente se hizo una recopilación bibliográfica de los trabajos realizados sobre las estructuras en cuestión (Falla del Suárez; Lineamiento al norte de la Mesa de Los Santos) tales como tesis de grado, planchas geológicas, informes técnicos, artículos científicos, entre otros, tanto en la zona de estudio como cerca de esta, además de la revisión de libros y artículos con el fin de profundizar y adquirir nuevos conceptos claves para el desarrollo del proyecto.

9.2. FASE DE CAMPO

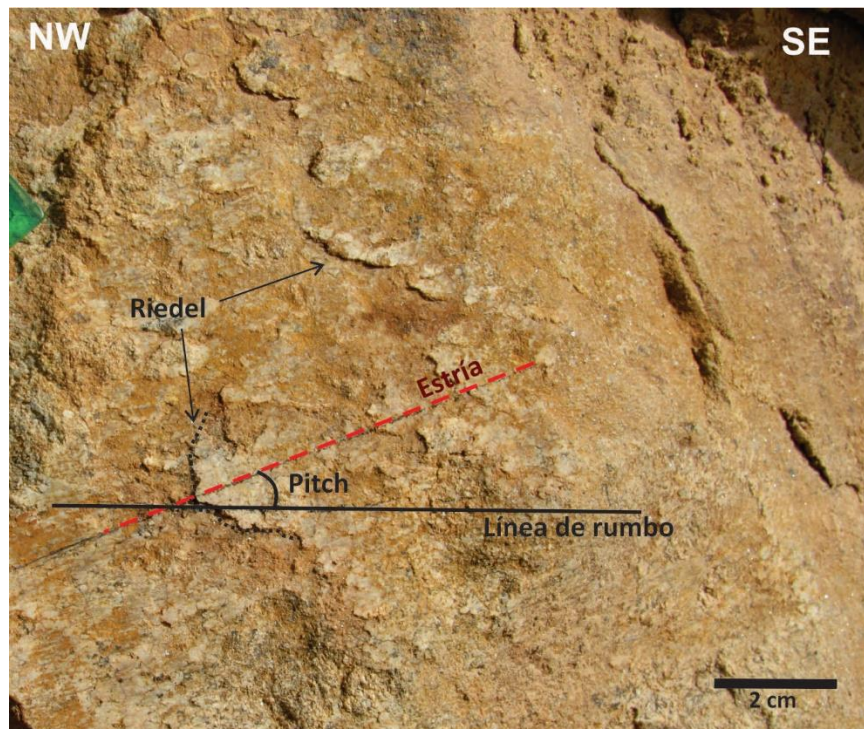
La fase de campo consistió en el control de las formaciones cartografiadas, sus contactos y características generales (recolección y descripción de muestras, junto con la toma de la orientación de los planos de estratificación) a lo largo del corredor de falla de las estructuras analizadas. Además, se realizó la toma de fotografías y la recolección de datos estructurales correspondientes a planos de diaclasas, planos estriados, inclinaciones aparentes, etc.

9.2.1. Medición de estrías

Para la toma estrías se procedió de la siguiente manera:

- Tomar de la medida del rumbo y buzamiento del plano estriado.
- Marcar con un lápiz la estría y la línea de rumbo, para tomar la medida del pitch, anotando y verificando su respectiva dirección.
- Determinar el sentido de movimiento de la falla mediante la interpretación de los indicadores cinemáticos presentes (riedel, anti-riedel, y/o escalones mineralizados) para asignar la calidad o certeza del dato tomado, teniendo en cuenta la claridad de la estría (Figura 23). Además, mediante el gráfico rápido de la estría, su plano y sentido en una red estereográfica, se comprueba la consistencia de los datos para evitar incoherencia en estos durante el trabajo de oficina.

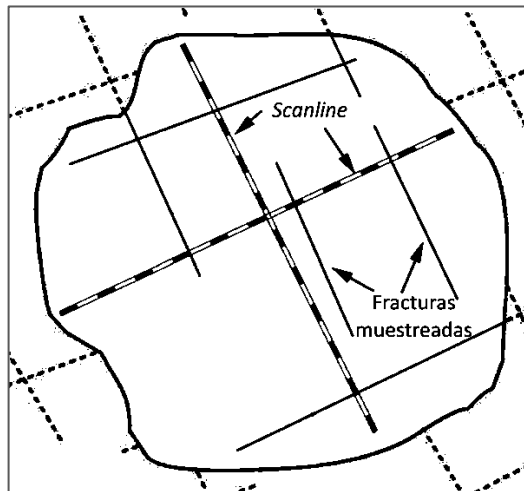
Figura 23. Plano estriado en una capa de arenisca perteneciente a la Formación Girón. Se observan los datos que son recolectados para definir la cinemática de la posible falla actuante (Pitch, dir de pitch, rumbo y buzamiento) además, se tiene como indicador cinemático los planos Riedel.



9.2.2. Medición de fracturas

Para la recolección de los datos de fracturas en cada afloramiento se usó el método *scanline*. Este método de muestreo se basa en la recopilación de datos de todas las fracturas que se cruzan en la línea de escaneo (Zeeb *et al.*, 2013) (Figura 24 y Figura 25).

Figura 24. Muestreo *Scanline*. Se utilizan dos líneas dispuestas de forma perpendicular entre ellas de tal forma que se evite el sesgo de orientación. Las líneas a trazos son las fracturas no muestreadas, mientras las líneas continuas son las que hacen parte del *scanline*.



Fuente: Zeeb *et al.* (2013). Modificado por los autores.

El método permite una medición rápida de las características de fractura en el campo, proporciona información unidimensional en redes de fracturas. Este método puede verse afectado por (1) sesgo de orientación, (2) sesgo de truncamiento, (3) sesgo de censura, y (4) sesgo de tamaño (Zeeb *et al.*, 2013). El sesgo de orientación puede reducirse o evitarse mediante el uso de un *scanline* perpendicular, y si es necesario, varios *scanline* se pueden utilizar en afloramientos para capturar diferentes conjuntos de fracturas (Zeeb *et al.*, 2013).

Figura 25. Línea de escaneo de fracturas para un afloramiento de la Formación Girón.



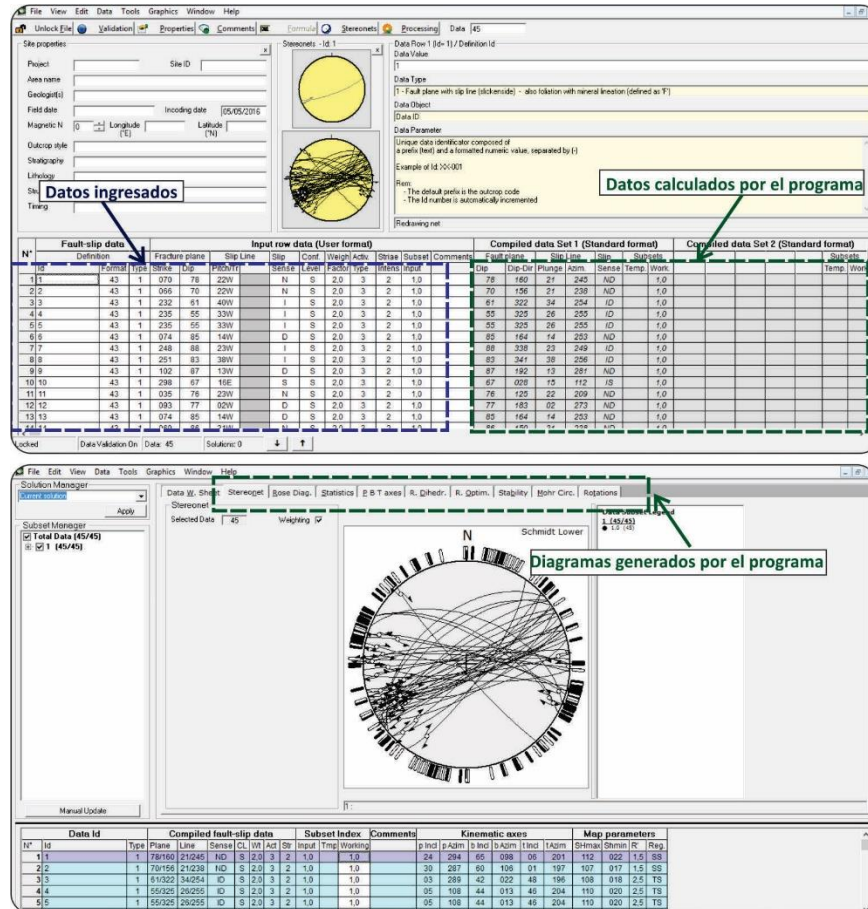
9.3. FASE DE PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En esta fase se realizó el procesamiento de los datos que fueron recolectados a lo largo de la fase de campo, así como las fotografías y las muestras de roca. Además, se realizó la interpretación de los mismos con el fin de cumplir los objetivos planteados para el proyecto.

9.3.1. Procesamiento de datos

Para el tratamiento de los datos de estrías se usó el programa Win Tensor 5.8.4 (Figura 26) y para los diagramas rosa tanto de estrías como de diaclasas se utilizó el programa Sg2ps.

Figura 26. Interfaz del programa Win Tensor con los datos de estrías en uno de los sectores de la zona de estudio.



Para los datos de estrías en Win Tensor, se ingresaron datos de rumbo y buzamiento del plano de falla, pitch y dirección de pitch de cada estría, el sentido del movimiento y grado de visibilidad de la línea en el plano; esto se realizó por sectores. El software genera varios diagramas, de los cuales se usaron los de ejes de PBT, mecanismo focal (Diedros Rectos), y Círculo de Mohr, con los cuales se determinó la dirección del esfuerzo que generó la deformación, el sentido de movimiento de los bloques adyacentes al plano de falla y el tipo de fallas (neoformadas o reactivadas).

En cuanto al procesamiento de los planos diaclasados, se ingresaron al software Sg2ps los datos de rumbo e inclinación de cada fractura, para generar el diagrama de rosa, y así poder observar las direcciones predominantes de los planos de diaclasas en cada sector. En el programa se usó una plantilla que facilitara el ingreso de los datos.

9.3.2. Cortes geológicos

Se realizaron cuatro cortes geológicos transversales a las estructuras estudiadas a lo largo de la zona de estudio, con el fin de mostrar los rasgos más destacados de las principales estructuras. Para ello se utilizaron los datos de estratificación recolectados durante la fase de campo y los datos preexistentes en los mapas base. Además se realizaron dos cortes geológicos regionales que se extienden más allá de la zona de trabajo, con el fin de relacionar las estructuras a una escala regional.

9.3.3. Análisis de resultados

Se revisó y analizó la información obtenida durante el procesamiento de los datos; se realizó la correlación de los resultados por la ubicación de los mismos, localizándolos en los mapas, con el fin de relacionar los resultados obtenidos con las estructuras presentes, y así solucionar el problema inicial, cumpliendo con los objetivos del proyecto.

9.4. FASE INFORME FINAL

En esta fase se elabora el informe escrito, que incluye una parte teórica (Introducción, objetivos, marco teórico y geológico, entre otros), los resultados y su respectiva interpretación (cinemática y relación entre estructuras, Zonas transversales, cortes geológicos y mapas). Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada que servirán de base para futuras investigaciones.

10. RESULTADOS

10.1. CONTROL CARTOGRÁFICO

Durante la fase de campo se realizó el control cartográfico de las unidades litológicas aflorantes en la zona de estudio (Figura 27), con el fin de verificar y redefinir contactos litológicos a una escala 1:25.000, tomando como base la Plancha 120 de Bucaramanga (Ward *et al.*, 1973) y el Mapa Morfotectónico del Sistema de Fallas del Suárez (Diederix *et al.*, 2008). Se realizó un total de 56 estaciones de trabajo; las coordenadas planas de las mismas se enmarcan en la Tabla 1. Además de lo anterior, se verificó el trazo y la vergencia de algunas estructuras con ayuda de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM). Además, para el control cartográfico se tuvo en cuenta la actualización geológica realizada durante el proyecto denominado 'Apoyo técnico para la revisión excepcional de los planes de esquema de ordenamiento territorial de los municipios localizados en la zona de embalse del proyecto Hidroeléctrico Sogamoso' durante los meses de marzo a Julio del año 2015 (Martínez y Nieves, 2015).

Es importante destacar que el control de campo realizado para este trabajo de investigación se basa principalmente en toma de datos estructurales y control estratigráfico de zonas aledañas a las respectivas estructuras estudiadas (Falla del Suárez, Falla Los Santos).

Tabla 1. Estaciones realizadas durante el trabajo de campo. Se muestran las respectivas coordenadas planas en Datum MAGNA Colombia Bogota.

ESTACIONES	COORDENADAS		
	ESTE	NORTE	ALTURA
Naje1	1102819	1256123	1077
Naje2	1102874	1256175	1067
Naje3	1102903	1256208	1066
Naje4	1102962	1256272	1067
Naje5	1102991	1256366	1057
Naje6	1102800	1256510	1025
Naje7	1107979	1258776	1542
Naje8	1107505	1258784	1503
Naje9	1107903	1258752	1504
Naje10	1107552	1260147	1362
Naje11	1107327	1260257	1324
Naje12	1107286	1260333	1300
Naje13	1107283	1260456	1325
Naje14	1102651	1256519	966
Naje15	1103198	1256123	1059
Naje16	1103216	1256138	1059
Naje17	1103297	1256232	1053
Naje18	1103349	1256288	1054
Naje19	1103385	1256314	1051
Naje20	1103374	1256360	1046
Naje21	1103252	1256487	1024
Naje22	1101302	1268437	708
Naje23	1100312	1264331	780
Naje24	1101095	1261653	819
Naje25	1101117	1256062	835
Naje26	1099810	1254523	775
Naje27	1100476	1256019	842
Naje28	1100741	1255753	814
Naje29	1100849	1255862	870
Naje30	1101047	1255971	874
Naje31	1100759	1255886	868
Naje32	1099000	1254596	366
Naje33	1098947	1254800	379

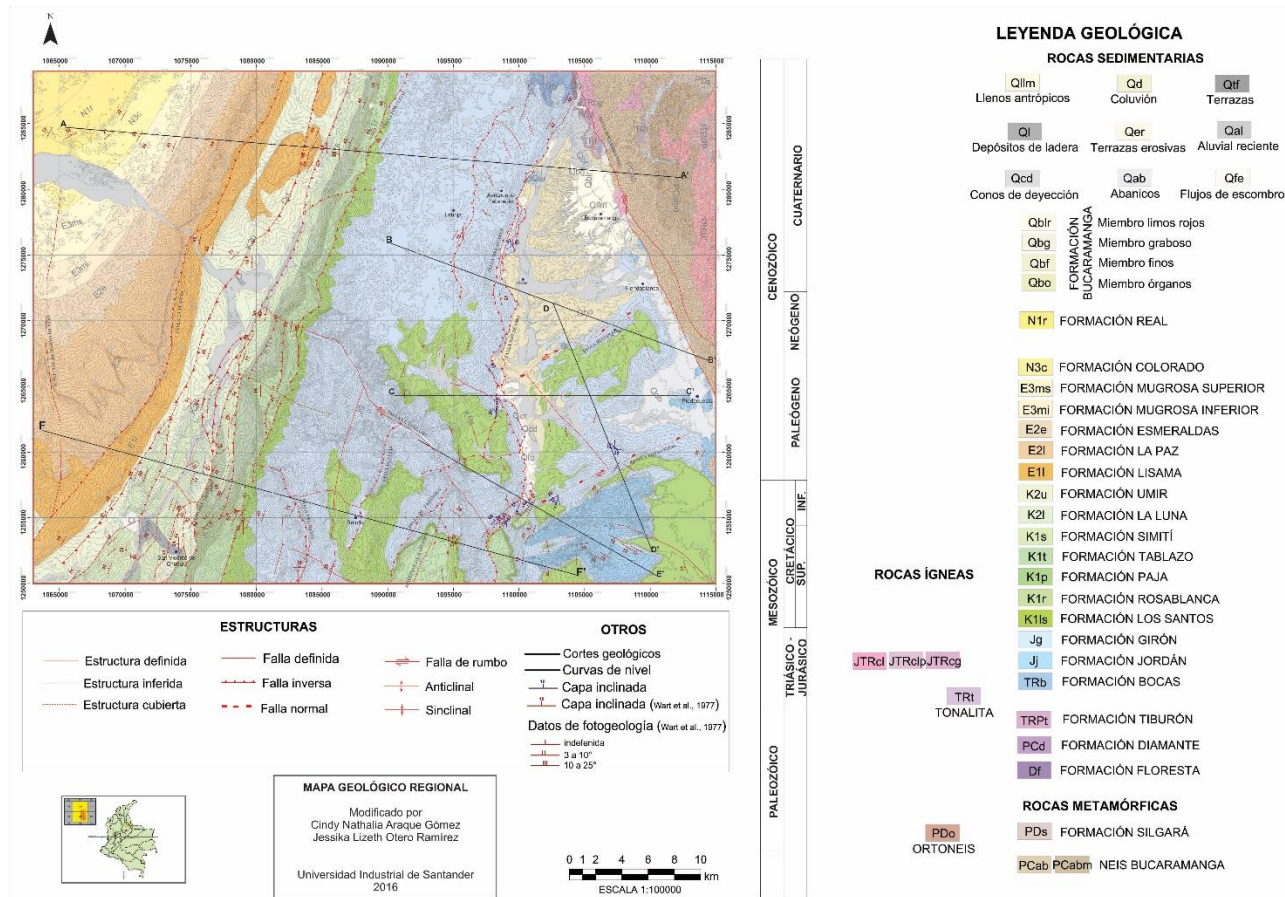
ESTACIONES	COORDENADAS		
	ESTE	NORTE	ALTURA
Naje35	1099063	1254535	383
Naje36	1099052	1254705	403
Naje37	1099181	1254884	454
Naje38	1099065	1254884	419
Naje39	1099074	1254769	409
Naje40	1098961	1254828	372
Naje41	1098873	1255127	379
Naje42	1098944	1254881	346
Naje43	1099472	1275730	0
Naje44	1099598	1275813	0
Naje45	1098543	1263972	997
Naje46	1098222	1263606	1051
Naje47	1098332	1262898	1157
Naje48	1098262	1262898	1144
Naje49	1098251	1263065	1124
Naje50	1098166	1254822	367
Naje51	1100180	1255198	850
Naje52	1098993	1267198	804
Naje53	1097830	1266369	1014
Naje54	1098564	1266540	917
Naje55	1099181	1266586	860
Naje56	1100274	1266325	820

Entre las modificaciones realizadas al mapa geológico, se encuentra el cambio de la Formación Paja, en el núcleo del Sinclinal de Zapatoca, por la Formación Rosablanca. Hacia este mismo sector, fue incluida la Falla de Zapatoca, dos fallas normales al este de esta y la Falla El Tablazo, las cuales son definidas en la el trabajo realizado por Martínez y Nieves (2015) y Osorio (2016). El mapa realizado por este último autor sirve de base para modificar el trazo del antiguo Anticlinal de Los Cobardes, denominado como Anticlinorio de los Yariguíes (Osorio, 2016).

Por otra parte, hacia el área de la Mesa de Los Santos y Ruitoque, fueron modificados los contactos de la Formación Los Santos y Rosablanca, al igual que al suroeste del Municipio de Girón. Hacia el sector de la Ciudad de Bucaramanga, se tomó como base la cartografía hecha por Diederix *et al.* (2008), quien hace una cartografía detalladas de las unidades cuaternarias en la zona.

Finalmente, con el fin de visualizar mejor la influencia de la estructuras de manera regional, se digitalizó un mapa (Figura 28) que incluye la zona de estudio y se extiende al oeste hasta la parte este del Sinclinal de Nuevo Mundo. Las estructuras mostradas hacia el sector fuera de la zona de estudio (Figura 28), se trazaron con base principalmente en la Plancha 120 de Bucaramanga (Ward *et al.*, 1973) y en el mapa propuesto por Cetina y Patiño (2013) en su tesis de grado.

Figura 28. Mapa geológico regional. Se observan las líneas de los cortes locales y los de escala regional (Ver Figura 29 y Figura 30, respectivamente). ANEXO C.



Fuente: Plancha 120 de Bucaramanga, modificada por los Autores.

Con base en el control cartográfico y la definición de las estructuras en el área, se realizaron cuatro cortes geológicos localizados perpendicularmente a las estructuras principales en la zona de estudio (Figura 29) y dos cortes que abarcan un zona más regional (Figura 30), con el fin de visualizar la relación de dichas estructuras con las unidades estratigráficas de la zona y entender su estilo estructural.

Para la generación de los cortes se tuvieron en cuenta los espesores de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (Tabla 2) reportados en la Memoria explicativa del departamento de Santander (Royero y Clavijo, 2001). Además se usaron inclinaciones aparentes para los datos que no eran perpendiculares a la línea de corte.

Tabla 2. Espesores reportados para el Valle Medio del Magdalena. Se mencionan además, los espesores utilizados para este trabajo. (Para un mejor control geométrico de los cortes estructurales, algunos espesores presentan un margen de error con respecto a los reportados).

FORMACIÓN	NOMENCLATURA	ESPEORES REPORTADOS (M)	ESPEOR USADO EN ESTE TRABAJO (M)
Real	N1r	500 - 700	500
Colorado	N3c	935 - 1.250	700
Mugrosa	E3mi-E3mf	550 - 850	700/400
Esmeralda	E2e	160 - 575	500
La Paz	E2l	240 - 800	800
Lizama	E1l	300 - 950	1000
Umir	K2u	800 - 1.400	1000
La Luna	K2l	280 - 630	300
Simití	K1s	250 - 660	500
Tablazo	K1t	240 - 325	200
Paja	K1p	150 - 625	400
Rosablanca	K1r	290 - 450	400
Los Santos	K1ls	150 - 650	300
Girón	Jg	3.000 - 4.500	100 – 3500
Jordán	Jj	528	> 500

Fuente: Adaptado de Royero y Clavijo (2001).

Figura 29. Cortes geológicos del el área de estudio. Ver ubicación y leyenda geológica en la Figura 27. ANEXO D.

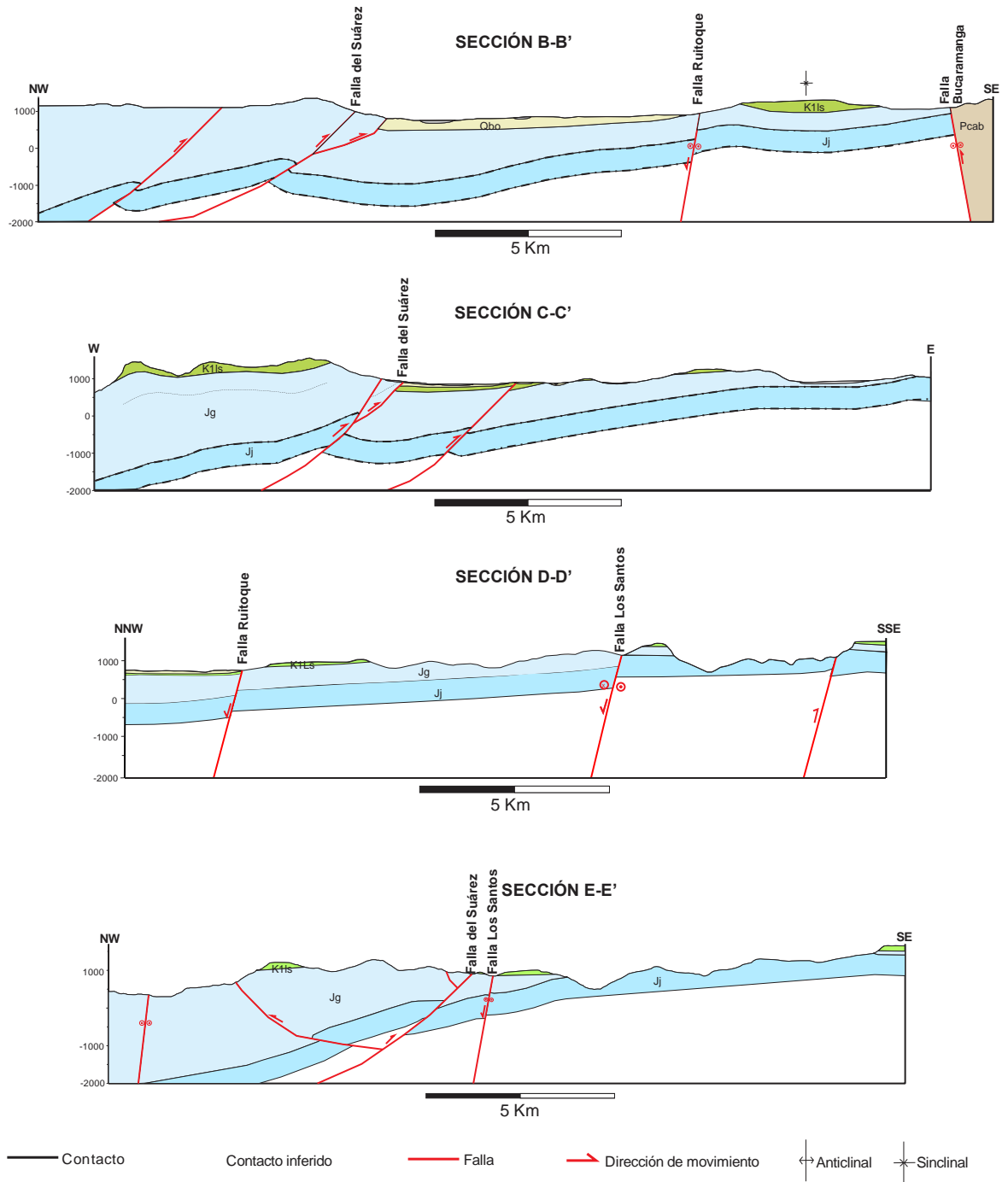
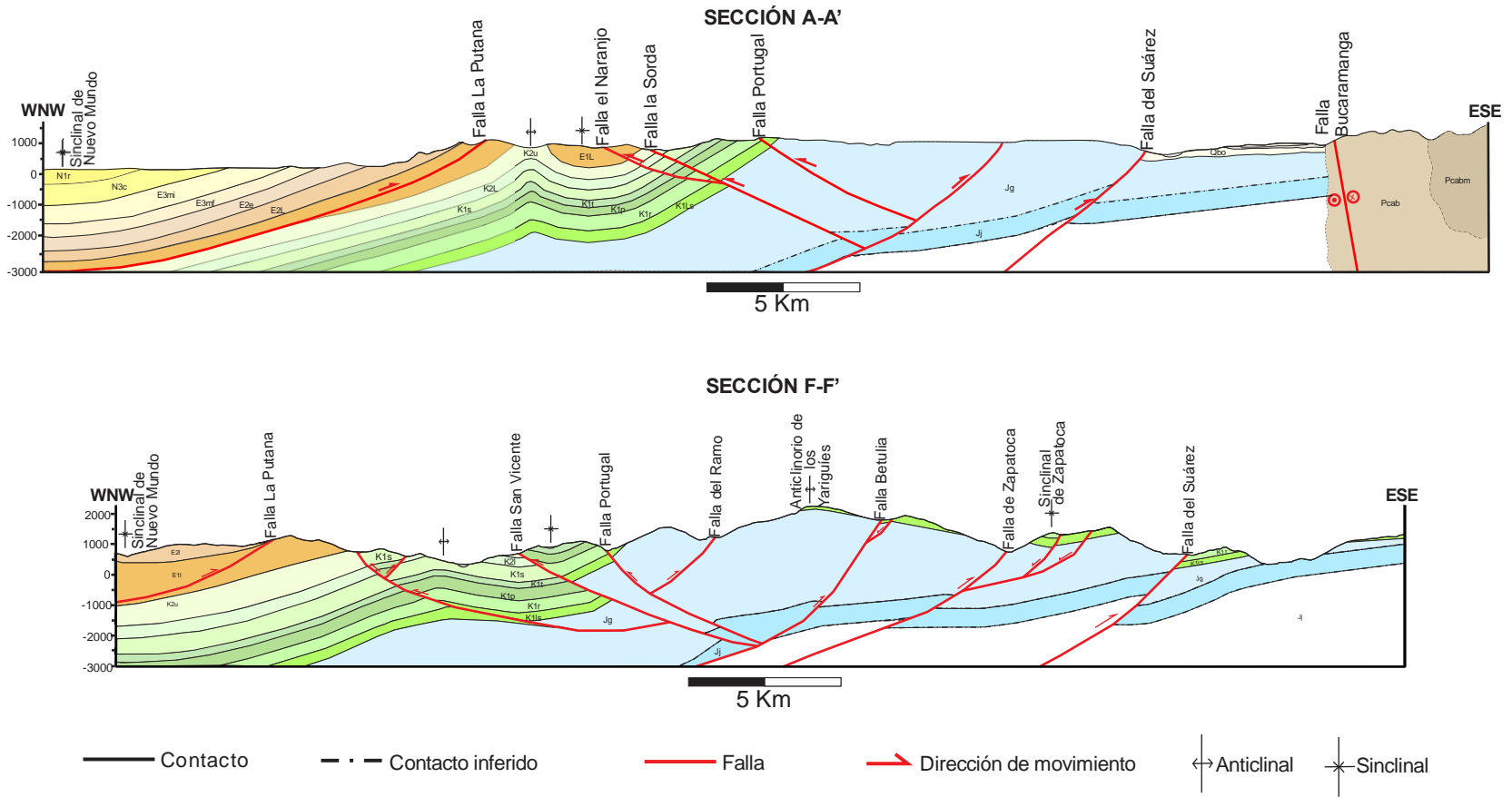


Figura 30. Cortes geológicos regionales. Ver ubicación y leyenda geológica en la Figura 28. ANEXO E.



La Formación Girón presenta un espesor variable, el cual es mayor en la Cordillera de Yariguíes y se va adelgazando progresivamente hacia el este, en la zona de mesas (Julivert, 1958). Estos cambios de espesor son representados en los cortes realizados en este trabajo, adoptando una variación desde los 3500 metros al oeste hasta aproximadamente 500 m en la Mesa de Ruitoque y 100 a 10 m de espesor en la Mesa de los Santos.

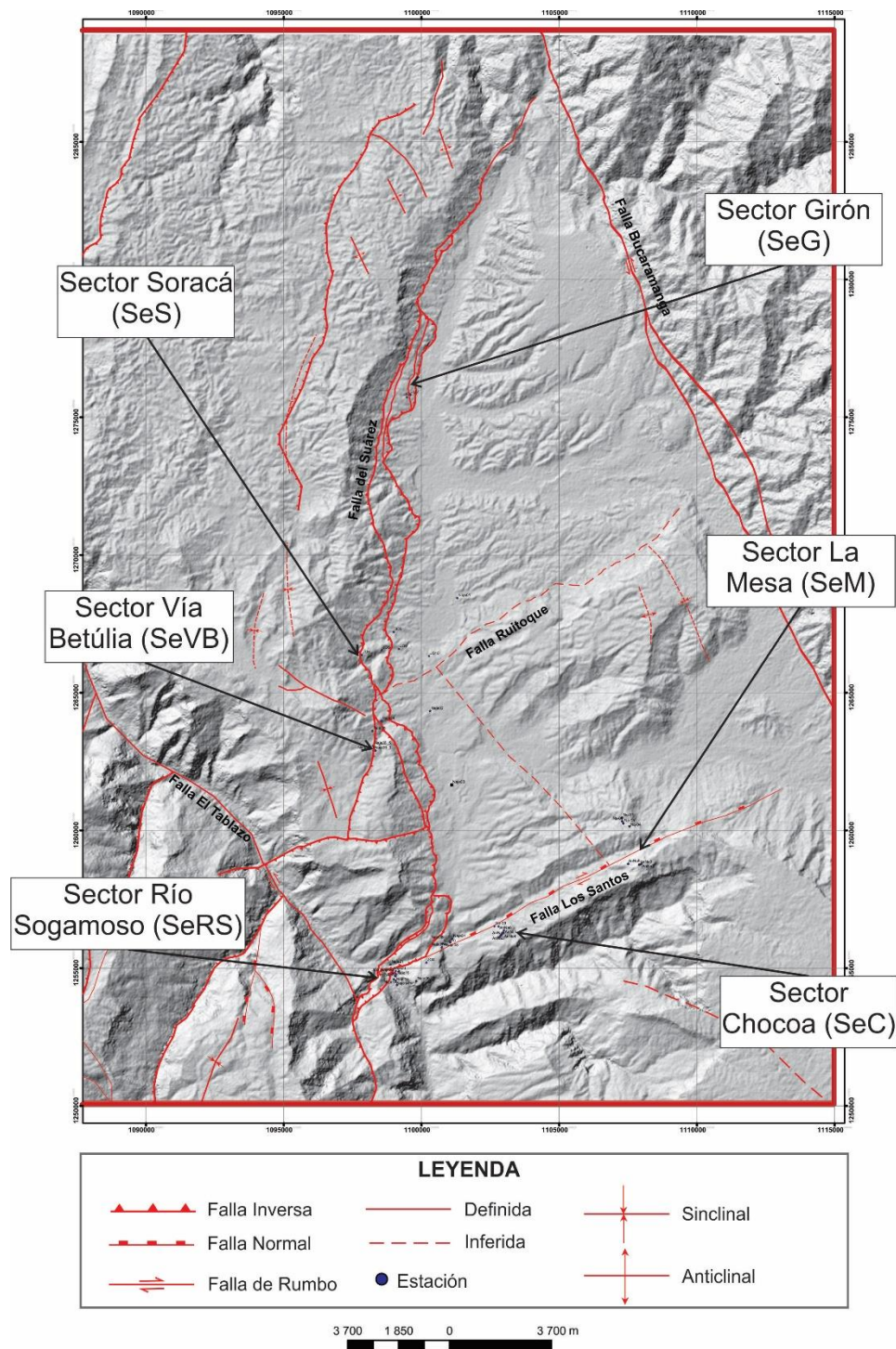
A partir de los cortes geológicos de la zona de estudio se puede apreciar el alto ángulo de las fallas en este sector, en contraste con los ángulos planteados para el sector este, fuera de la zona de estudio, en donde las fallas presentan sus despegues principalmente en las formaciones de edad cretácica.

10.2. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS ESTRUCTURALES

El área fue dividida en seis sectores (Figura 31) y los datos estructurales de cada sector fueron analizados en dos grupos, uno formado por planos de estrías y otro formado por planos estriados. Para el primer grupo se realizaron diagramas de esfuerzos según el método PBT, Diedros rectos, diagrama de Mohr (Ver explicación en el marco teórico) y diagramas rosa. Para el segundo grupo se realizaron diagramas rosa para determinar las direcciones principales de esfuerzos; tres de los sectores cuentan únicamente con datos de diaclasas.

Para el procesamiento de los datos estructurales se tuvo en cuenta la Ley de Anderson (1951), que propone ángulos $> 45^\circ$ para fallas normales, ángulos $< 45^\circ$ para que se originen fallas inversas y ángulos de inclinación cercanos a la vertical para las fallas de rumbo.

Figura 31. Ubicación de los diferentes sectores estudiados en la zona de estudio. Se observan también las estaciones realizadas en el desarrollo del proyecto.

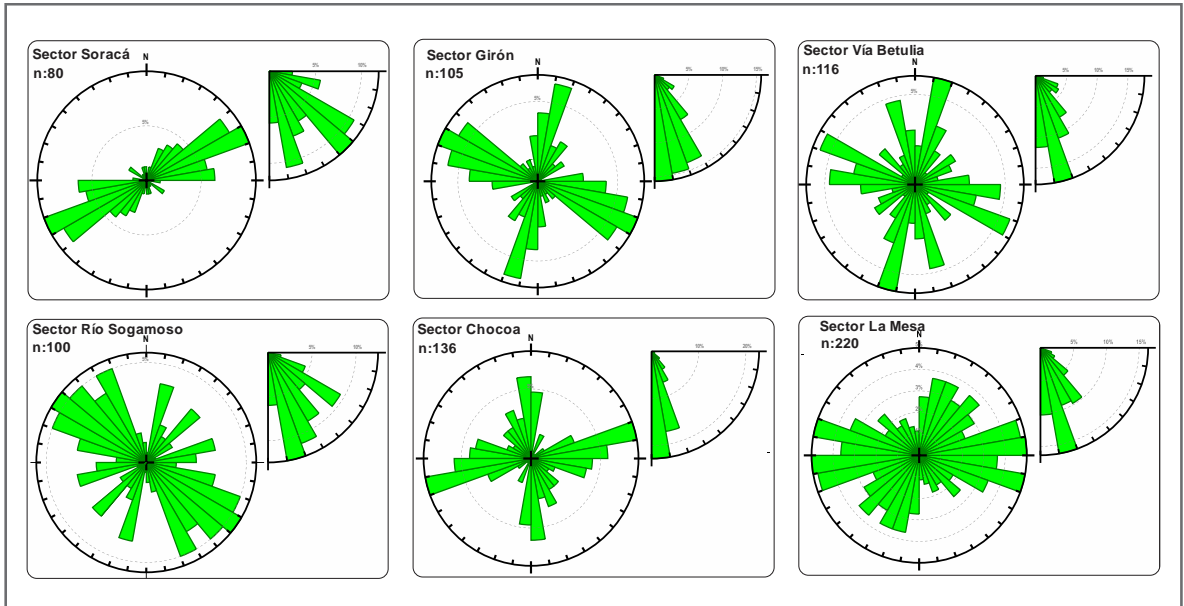


10.2.1. Diaclasas

El total de planos diaclasados medidos en el área de estudio fue de 607. El Sector Girón (SeG) hace referencia a un afloramiento ubicado en el Municipio de Girón en el que se midieron 105 planos; en el Sector Río Sogamoso (SeRS) se tomaron 100 datos de diaclasas, a lo largo de la vía que comunica los municipios de Girón con Zapatoca, en el Cañón del Río Sogamoso, y 80 datos en cercanías a esta vía, en la vereda Soracá (SeS). El Sector Vía Betulia (SeVB) se localiza sobre la vía que conduce del municipio de Girón a Betulia, allí fueron medidos 116 planos diaclasados. El Sector La Mesa (SeM) se ubica en la Mesa de los Santos, en donde se midieron 136 datos de diaclasas. Los 220 datos restantes fueron tomados por la vía que conduce al proyecto “Construcción del relleno sanitario parque Chocóa”, desvío de la vía que comunica los municipios de Girón y Zapatoca, sitio denominado en este estudio como Sector Chocóa (SeC).

A partir de los datos de diaclasas se generaron diagramas rosa (Figura 32) que ayudan a visualizar las direcciones principales de diaclasamiento, asociadas a las distintas estructuras existentes en el área. En el Sector Girón (SeG) se presentan dos orientaciones principales, una tendencia NNE-SSO y otra ONO-ESE; hacia el Sector Vía Betulia (SeVB) son visibles dos orientaciones principales en sentido NNE-SSO y ONO-ESE, además de una orientación menor de dirección NNO-SSE; en el Sector Soracá (SeS) se presenta una tendencia principal orientada NE-SO; y hacia el Sector Río Sogamoso (SeRS) se evidencia una tendencia principal NO-SE y otras menores orientadas principalmente NE-SO. En el Sector Chocóa (SeC) se presentan dos grupos principales de diaclasas, en el primer grupo los datos están orientados ENE-OSO, mientras que el segundo grupo de datos presenta principalmente orientaciones NNO-SSE. Los planos de diaclasas en el Sector La Mesa (SeM) evidenciaron datos en todas las direcciones, notándose dos tendencias principales, la mayor tendencia de planos está entre el rango de direcciones ENE-OSO a ESE-ONO, y otra tendencia menor en un rango desde NNE-SSO a NE-SO.

Figura 32. Diagramas rosa para los datos de diaclasas hallados en cada sector del área de estudio. Se muestran la orientación de los principales conjuntos de fracturas en azimuth de rumbo.

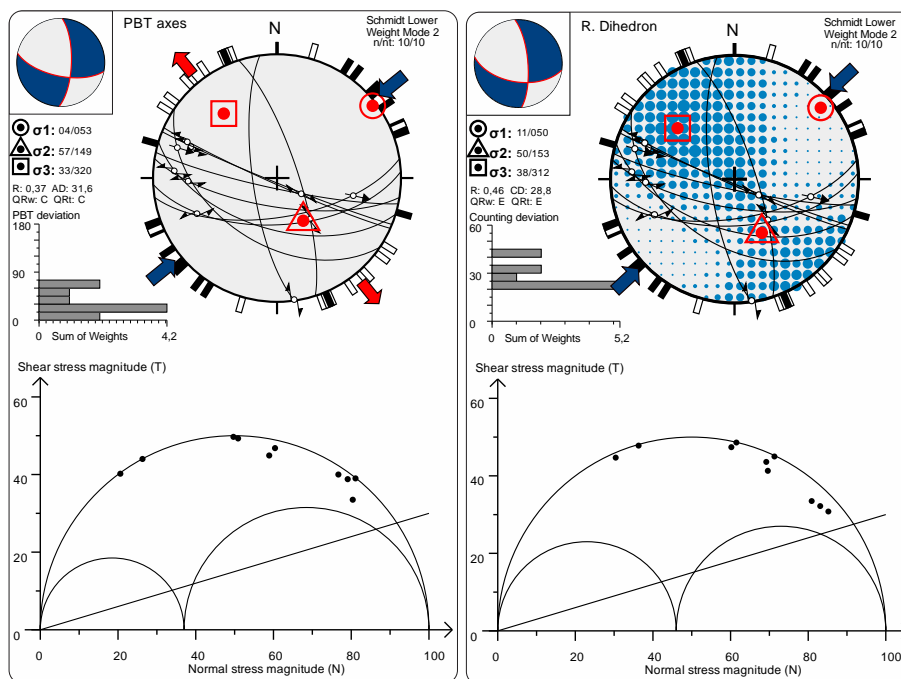


10.2.2. Estrías

Para los datos de estrías se adoptan las mismas subdivisiones dadas para el procesamiento de diaclasas, exceptuando los sectores Soracá, Via Betulia, y La Mesa (SeS, SeVB, SeM), en los cuales no se encontraron planos con estrías. Además, el SeRS se dividió en tres subgrupos (a, b y c, Figura 42) debido a que este sector es el que presenta mayor complejidad estructural, tanto por la sinuosidad y curvatura en el trazo de la Falla del Suárez como por su interacción con una estructura de dirección ENE-OSO (Lineamiento sobre la quebrada Los Montes ó Falla Los Santos). En cuanto al procesamiento de los datos, se discriminan los planos estriados que no pudieron ser formados bajo un mismo tensor de esfuerzos con ayuda de la función de optimización del software Win-Tensor.

Sector Girón: En el SeG se tomaron 10 datos de estrías que dieron como resultado (Figura 33) un tensor transpresivo (R: 0.37-0.3) y una orientación del Shmax: 53°-62. Los círculos de Mohr muestran una distribución mayoritaria de los datos en el dominio de reactivación, y en menor porcentaje en el de neoformación. Debido a que se contaba únicamente con 10 datos se decidió no descartar ninguno de estos para obtener un resultado estadísticamente más confiable.

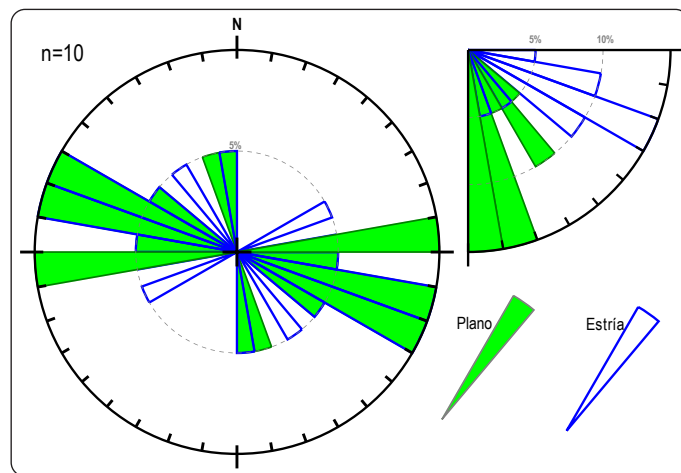
Figura 33. Tensores de esfuerzos y círculos de Mohr hallados para los datos de estrías reunidos en SeG; izquierda: método PBT; derecha: diedros rectos. Se evidencia un tensor transpresivo y una orientación del esfuerzo máximo de 53-62°; la mayoría de los de datos en el dominio de reactivación.



Dos orientaciones principales en los planos estriados son evidenciadas (Figura 34), una NNO-SSE y otra ONO-ESE, que a pesar de que no ser paralelas con la dirección N-S de la Falla del Suárez en este punto, pueden ser asociadas a las estructuras riedel (R) y

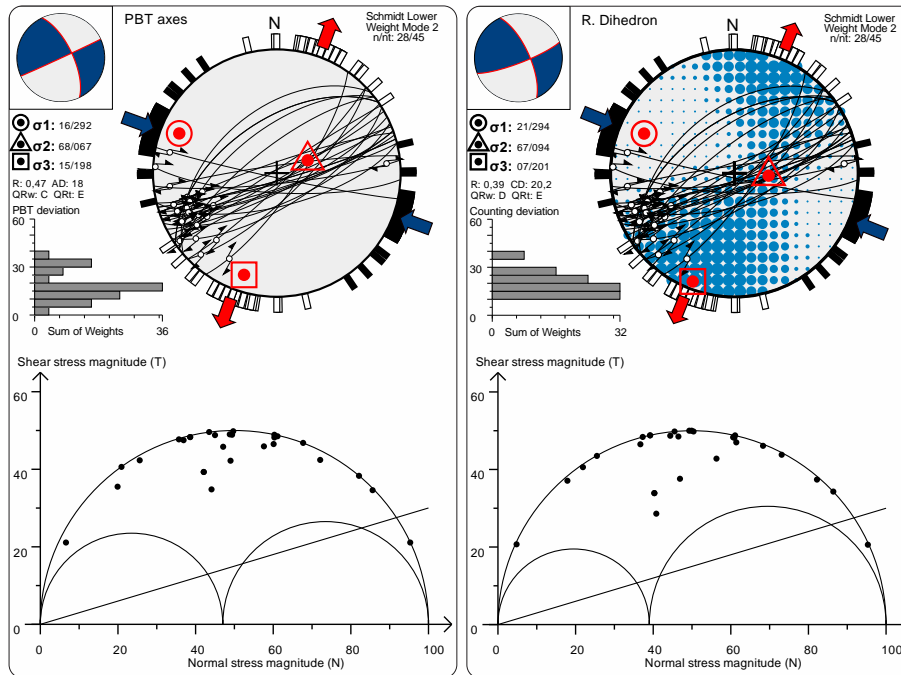
antiriedel (R') de esta falla, pues guardan una diferencia de ángulos de 20° a 70° respecto de su trazo. La mayoría de planos están ubicados en los sectores de neoformación y reactivación.

Figura 34. Diagrama rosa de estrías para el SeG. Se observan las principales tendencias para las estrías usadas en el análisis.



Sector Chocoa (SeC): A este sector pertenecen 45 datos de estrías. Luego de hacer la respectiva optimización en el programa (Win-tensor), quedaron 28 datos compatibles y 17 no compatibles con el tensor de esfuerzos principal. Al correlacionar los resultados de los datos compatibles con los círculos planteados por Burg (2011), se puede inferir un régimen de rumbo a transpresivo con un $R: 0.47 - 0.39$, donde σ_2 estaría más cerca a σ_3 que a σ_1 . Además se evidencia una orientación del Sh_{max} entre $292^\circ - 294^\circ$; en los círculos de Mohr, la mayoría de los datos se distribuyeron en los dominios de reactivación y neoformación (Figura 35).

Figura 35. Gráficos estructurales por el método PBT (izquierda) y diedros rectos (derecha), con sus respectivos círculos de Mohr hallados para los datos compatibles de estrías en SeC. Se muestra un tensor radial a transpresivo; la mayoría de los datos se distribuyeron en los dominios de reactivación y neoformación.



Para los 17 datos incompatibles se realizó el mismo procesamiento que para los datos compatibles; los resultados evidencian un régimen ligeramente transtensivo con un R: 0.5 – 0.68 y una orientación del Sh_{max} entre $200^\circ - 191^\circ$; en los círculos de Mohr, la mayoría de los datos se distribuyeron en los dominios de neoformación y en menor cantidad en la zona de reactivación (Figura 36).

Además se observaron dos tendencias principales en los datos, para los compatibles hay una dirección principal en sentido ENE-OSO, que también es visible en los datos incompatibles, los cuales presentan además otra tendencia en sentido ESE-ONO (Figura 37).

Figura 36. Tensores de esfuerzos y círculos de Mohr hallados para los datos incompatibles de estrías reunidos en SeC; izquierda: método PBT; derecha: diedros rectos. Se evidencia un tensor transpresivo; la mayoría de los datos se distribuyeron en los dominios de reactivación y neoformación.

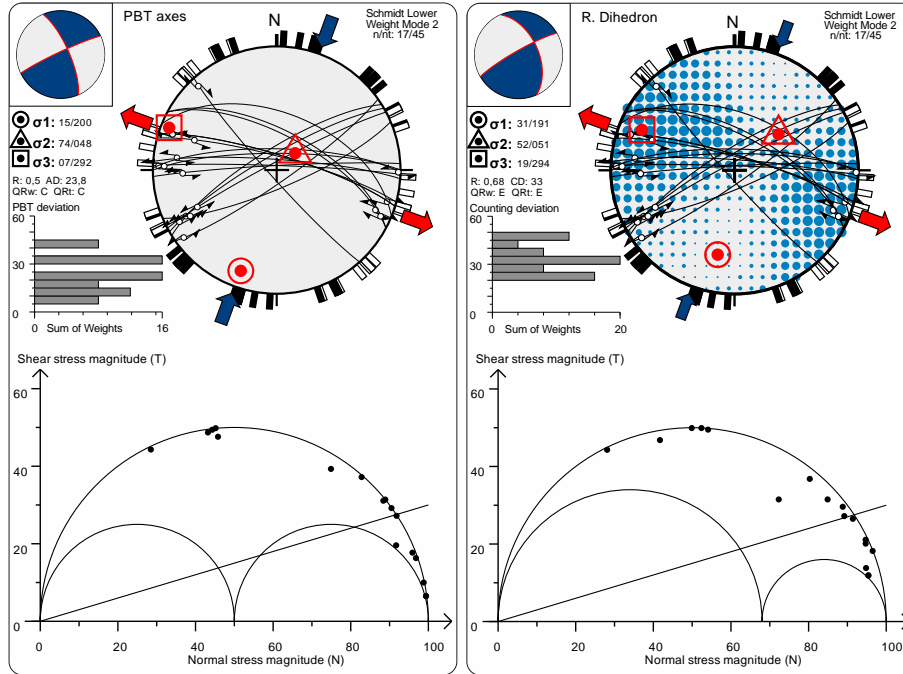
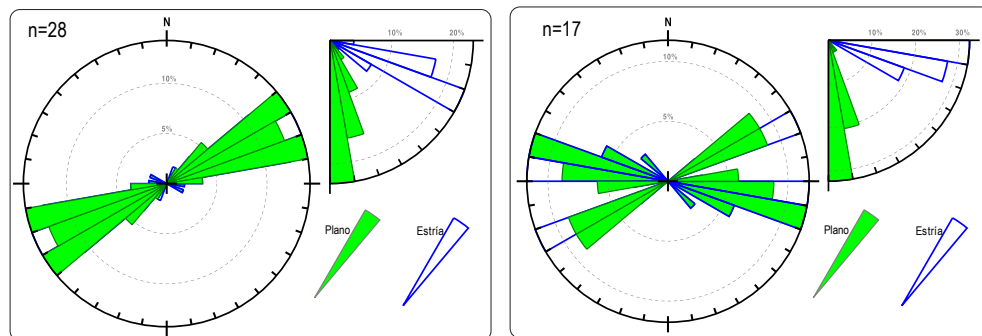
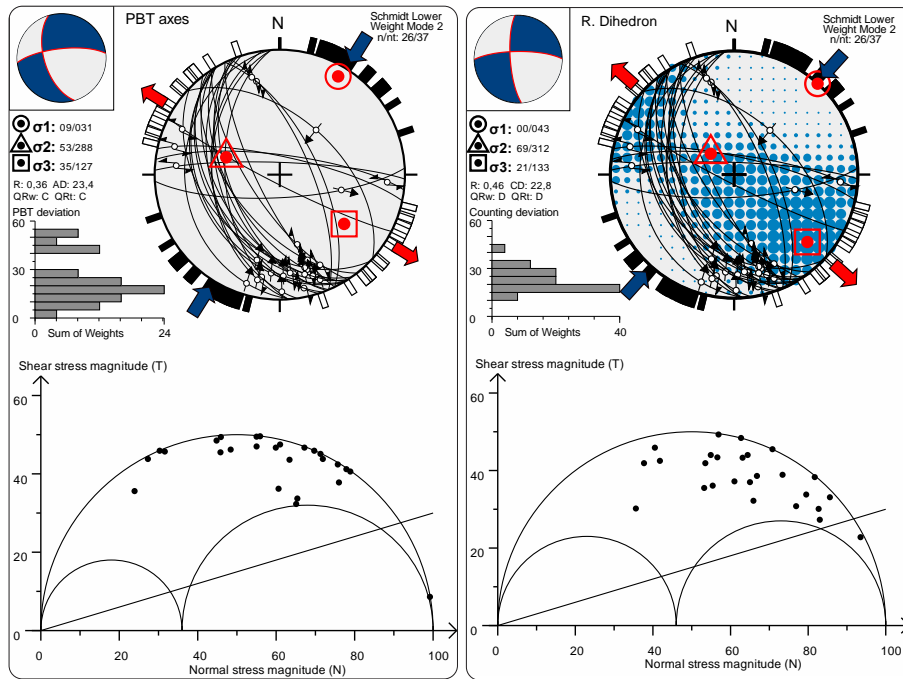


Figura 37. Diagrama rosa para los datos de estrías tomados en el SeC. A la izquierda se observa la tendencia principal para los datos compatibles y a la derecha, las principales direcciones de los datos incompatibles.



Sector Río Sogamoso (SeRS): En el SeRS se encontraron 37 planos de estrías, de los cuales se descartaron 11 datos durante el procesamiento. El resultado de los primeros 26 datos evidencia un régimen transpresivo con $R: 0.36 - 0.46$, donde σ_2 casi en la vertical que estaría ligeramente más cerca a σ_3 que a σ_1 ; y una dirección del S_{hmax} : $31^\circ - 43^\circ$ (Figura 38).

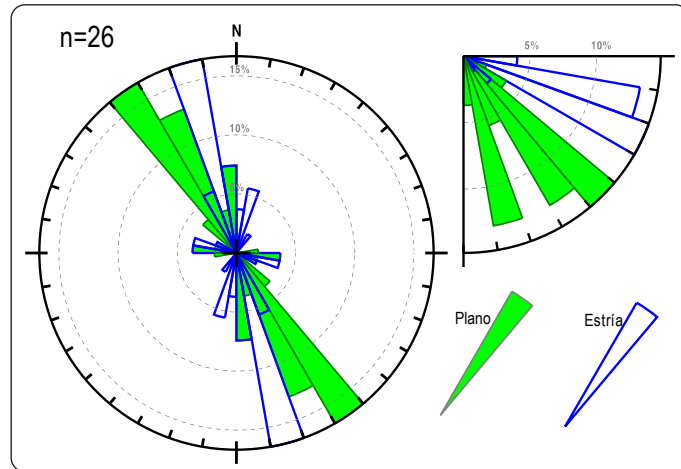
Figura 38. Gráficos estructurales por el método PBT (izquierda) y diedros rectos (derecha), con sus respectivos círculos de Mohr hallados para los datos compatibles de estrías en SeC. Se muestra un tensor transpresivo; la mayoría de los datos se distribuyeron en los dominios de reactivación.



Los planos están principalmente orientados en un rango de NNO-SSE a NO-SE (Figura 39) y al igual que en el SeG guardan una diferencia de ángulos de 20° a 70° respecto del trazo de falla, que en este sector tiene una dirección de $N20^\circ E$. Lo anterior sugiere que la mayor parte de planos estriados analizados están asociadas a las estructuras riedel (R) y

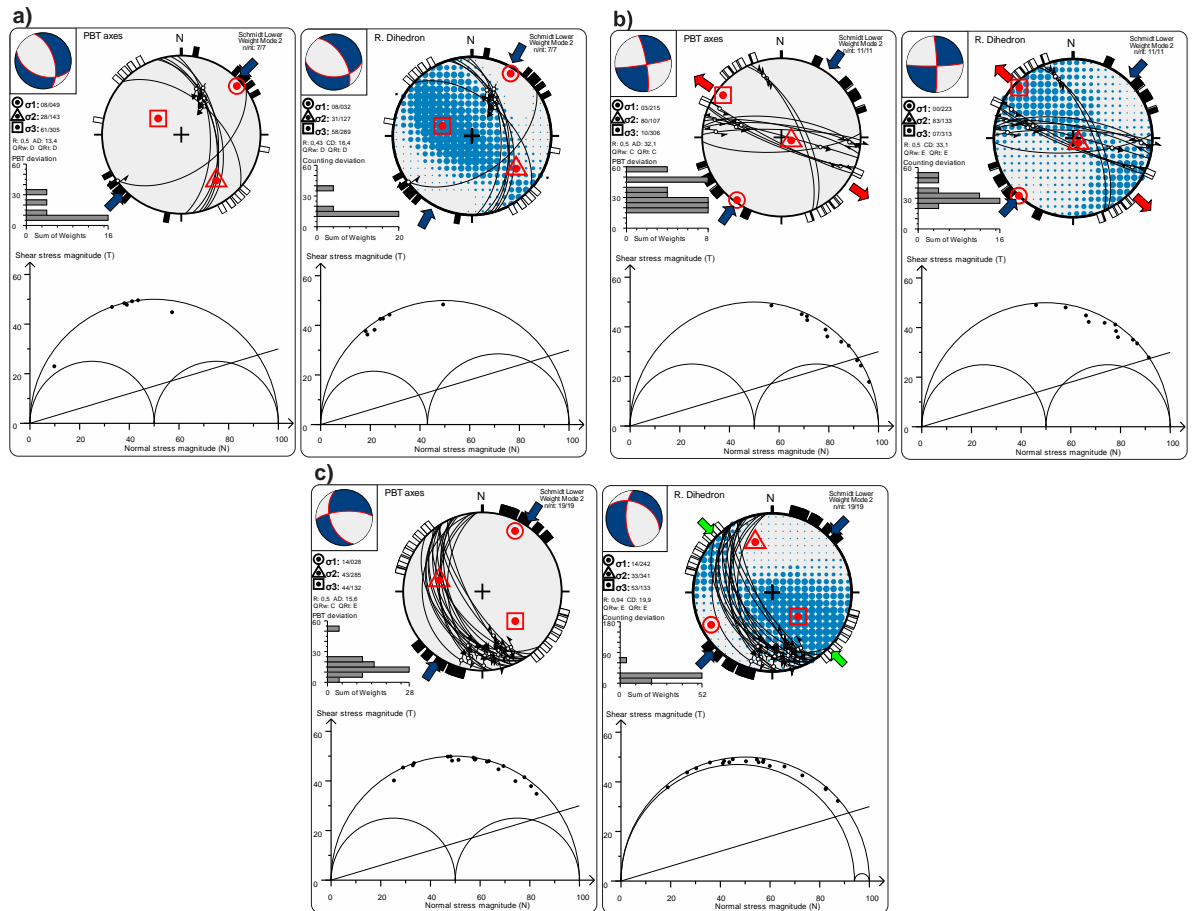
antiriedel (R') de la Falla del Suárez. Los planos orientados en direcciones E-O pueden estar asociados a fallas transversales en la zona.

Figura 39. Diagrama rosa para los datos de planos estriados medidos en el SeRs. Se muestran las tendencias principales que toman los datos en este sector.



Como se menciona anteriormente, con el fin de obtener un mejor entendimiento de los datos en este sector (SeRS), las estrías fueron procesadas en tres subconjuntos (Figura 40) (a, b y c) de acuerdo a su localización.

Figura 40. Tensores de esfuerzos por el método PBT hallados para los datos de cada subconjunto del sector Río Sogamoso. Los tensores de esfuerzos son similares para los tres puntos, con una dirección NE-SO; los datos estriados están ubicados en los sectores de reactivación y esporádicamente en el sector de reactivación.



11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

11.1. CINEMÁTICA DE LAS ESTRUCTURAS

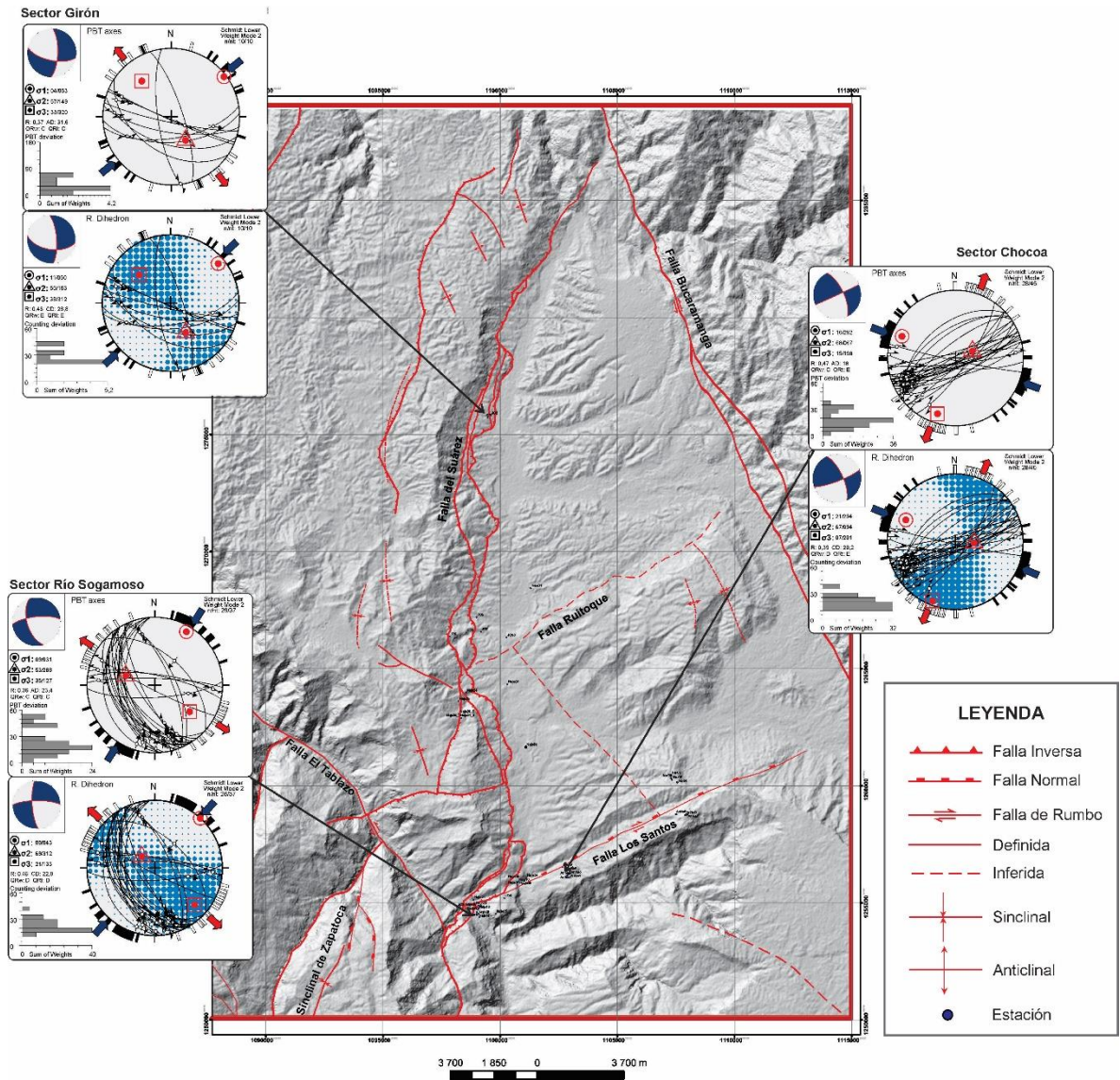
En la zona de estudio se determinaron tres direcciones diferentes para el esfuerzo de máximo acortamiento: NE-SO, NNO-SSE y NO-SE, que son relacionadas con las estructuras presentes en el área. Con el fin de facilitar el análisis de los resultados de planos estriados y observar la influencia de las estructuras en los datos vistos, se hace un análisis de los tensores obtenidos por el método de Diedros rectos y ejes PBT, con respecto a la ubicación geográfica (Figura 41).

Los datos de planos estriados tomados en el Sector Girón (SeG) y el Sector Rio Sogamoso (SeRS) son asociados a las fracturas riedel, antiriedel y al trazo de la Falla del Suárez, la cual tiene una dirección general NNE-SSO que en el SeRS varía localmente a NE-SO. Los datos de estrías tomados en el Sector Chocó (SeC) están posiblemente relacionados al lineamiento de la Quebrada Los Montes, que tiene una dirección ENE-OSO.

Para el SeC los datos de estrías están orientadas de forma subparalela al lineamiento de la Quebrada Los Montes. En el análisis se evidencia que el comportamiento predominante de esta estructura es de tipo dextral, el cual posea una componente en la vertical de tipo normal; por otra parte según el círculo de Mohr, estos planos corresponden en su mayoría a fracturas reactivadas.

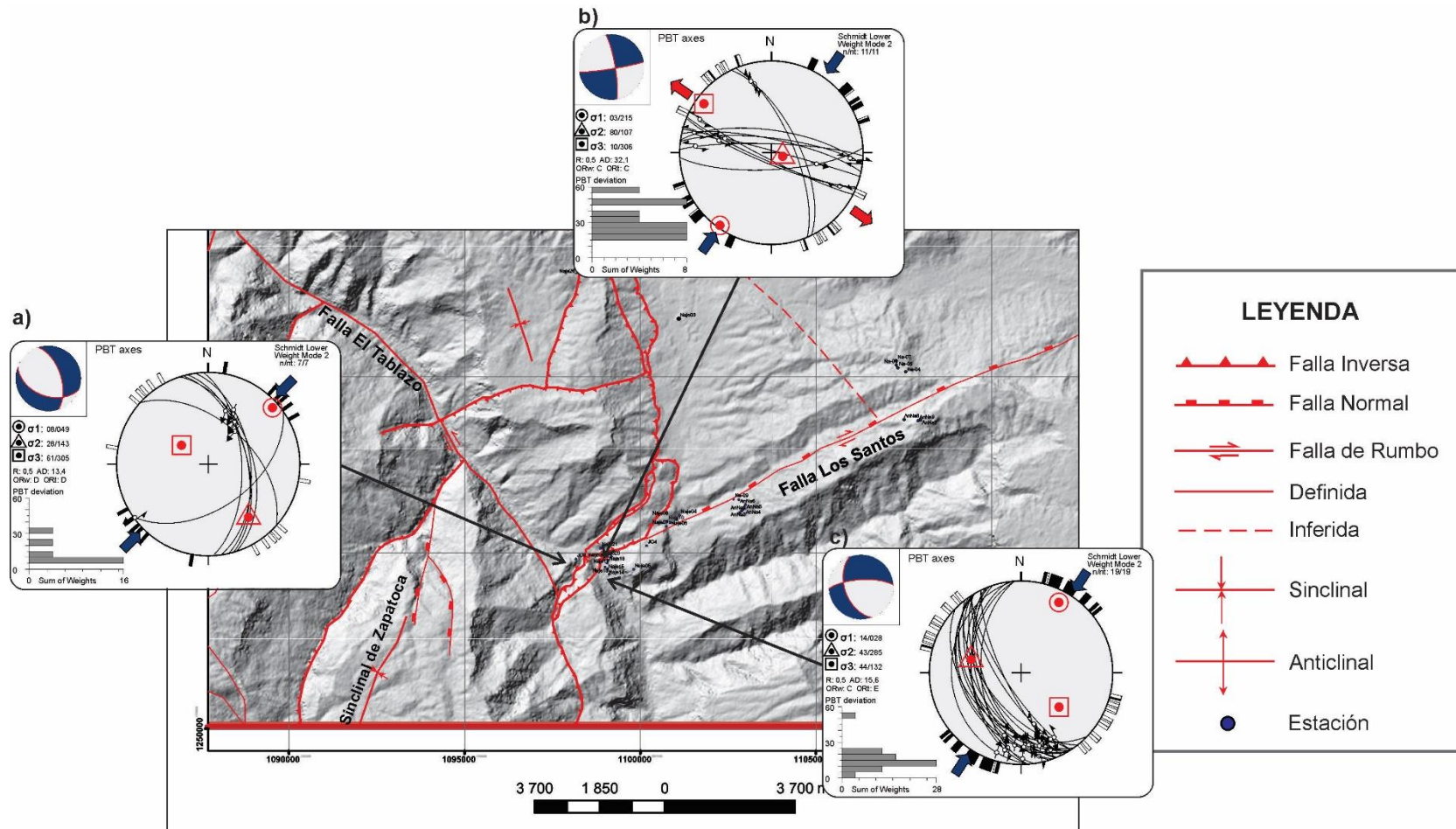
Hacia el SeRS se observa una diversidad en los datos, posiblemente asociada a la interacción de la Falla del Suárez y Los Santos en cercanías a este punto, por lo cual se decidió dividir estos datos en tres grupos (a, b y c; Figura 42) para obtener una mejor interpretación.

Figura 41. Distribución tensores de esfuerzos por el método ejes PBT y diedros rectos hallados para los datos de planos estriados en cada sector.



En el punto a) se observa que los planos estriados presentan una inclinación al este y una dirección NE-SO, en el punto b) la mayoría de las estrías están inclinados hacia el oeste, conservando la misma dirección, y en el punto c) la mayor parte de los datos tienen direcciones E-O y se inclinan al NE.

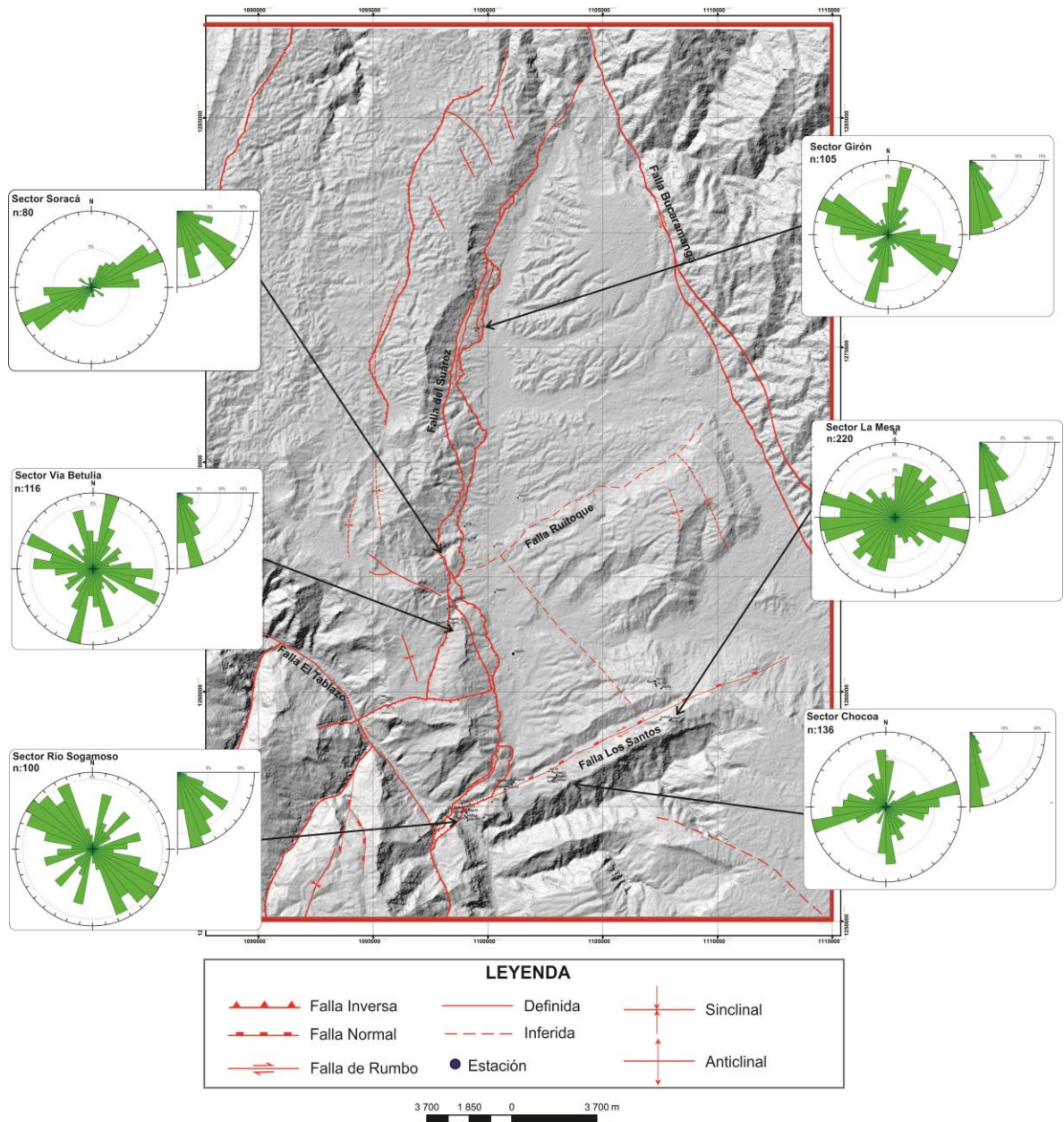
Figura 42. Tensores de esfuerzos por el método PBT hallados para los datos de cada subconjunto del sector Río Sogamoso.



Debido al buzamiento de los planos en el punto c) y a su dirección general E-O, estos datos son relacionados al lineamiento de la Quebrada Los Montes, mientras los datos del punto b) se asocian a la Falla del Suárez. Por otra parte, a pesar que la dirección de los planos estriados en el punto a) es cercana a la dirección de la Falla del Suárez, las estrías en este punto no presentan el mismo buzamiento al oeste que ha sido reportado para esta estructura por varios autores (e.g. Londoño, 1982; Pulido, 1979; París *et al.*, 2000; Diederix *et al.*, 2008; Flórez y Núñez, 2016); en el más reciente de estos trabajos (Flórez y Núñez, 2016) presentan unas fotografías tomadas en la sección sur de la Falla del Suárez, entre El Hato y La Fuente (Santander), en donde es claro el buzamiento al O (vergenza E) de la Falla del Suárez. De acuerdo a lo anterior, se plantea que en el SeRS se da un retrocabalgamiento de la Falla del Suárez que explica el cambio de buzamiento de O a E en los datos de este subsector.

Por otra parte, los resultados de los planos de diaclasas (Figura 43) reflejan que las direcciones preferenciales de las diaclasas tienen relación con las estructuras falladas ubicadas en la zona. Los datos orientados NNE-SSO del Sector Girón (SeG), NNO-SSE en el Sector Vía Betúlia (SeVB), N-S en el Sector Chocóa (SeC) y NE-SO en el Sector Río Sogamoso y Sector Soracá (SeRS y SeS, respectivamente) están directamente relacionados con la Falla del Suárez, quien a pesar de tener una tendencia general NNE-SSO, presenta cambios locales en su dirección de rumbo. Las diaclasas con orientaciones NO-SE en el Sector Río Sogamoso (SeRS) pueden estar asociadas a la Falla El Tablazo. En el Sector Chocóa (SeC) y Sector La Mesa (SeM), los planos orientados ENE-OSO se relacionan al trazo de la Falla Los Santos y los demás datos pueden estar asociados a estructuras riedel y antiriedel de la falla y/o a estructuras cercanas.

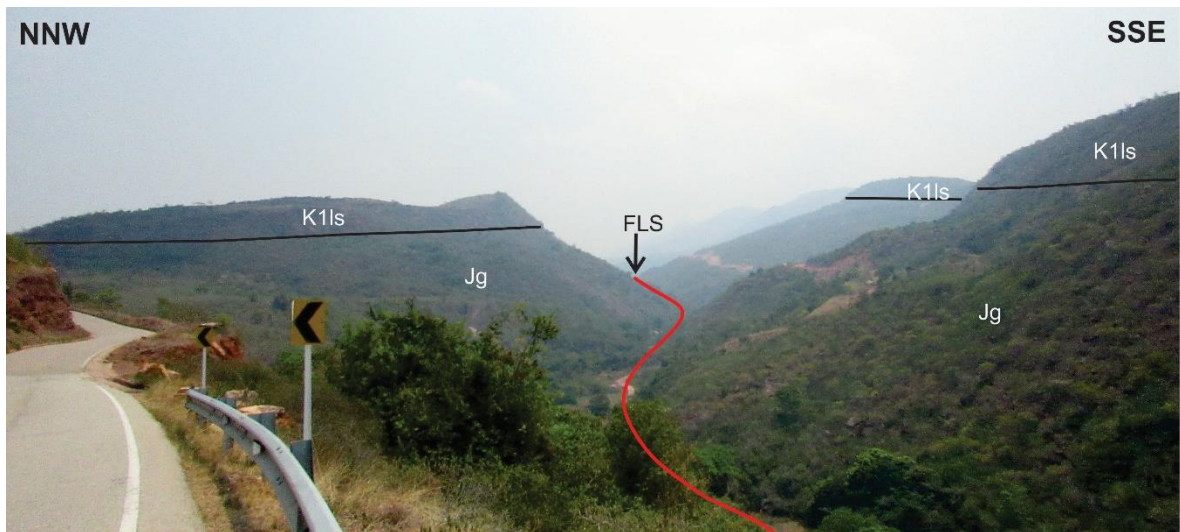
Figura 43. Diagramas rosa para los datos de diaclasas localizados en el mapa estructural de la zona de estudio. Se observan los diagrama rosa ubicados en cada sector estudiado.



11.1.1. Falla Los Santos

A partir del análisis de los datos recolectados en campo y la información obtenida (cambios estratigráficos, rasgos morfológicos y estructurales), se hace la descripción del lineamiento localizado sobre la quebrada Los Montes al norte de la Mesa de Los Santos. En la zona de estudio, se presenta un fuerte diaclasamiento y el movimiento de algunas fracturas sobre las Formaciones Girón y Los Santos, las cuales son observadas en el corredor del lineamiento, siendo la Formación Girón la más afectada. Además, teniendo como guía la altura a la cual se localiza el contacto casi horizontal entre las Formaciones Girón y Los Santos, a ambos lados del trazo de la estructura, se define un salto estratigráfico de aproximadamente 100 metros (Figura 44). Por último, los datos de estrías recolectados muestran una estructura con movimiento en rumbo dextral y una componente normal en la vertical; razones por las cuales, se propone nombrar a esta estructura como Falla Los Santos.

Figura 44. Trazo Falla Los Santos. Se muestran las unidades afectadas (K1ls: Formación Los Santos; Jg: Formación Girón) y el salto estratigráfico de la misma. Fotografía tomada al margen derecho de la vía Zapatoa-Bucaramanga.



11.1.2. Falla del Suárez

Con base en fotografías de campo (Figura 45 y Figura 46), y del análisis de datos de estrías y diaclasas en su mayoría medidas en el SeRS, se plantea que la Falla del Suárez presenta una vergencia al E y su cinemática es inversa con componente dextral. Además, debido a que en trabajos como el de Flórez y Núñez (2016) a partir de datos de estrías tomadas entre los municipios El Hato y La Fuente (Santander), definen a esta estructura como una falla inversa de componente sinistral, se plantea que la Falla del Suárez cambia su componente en rumbo de tipo sinistral (hacia el sur, fuera de la zona de trabajo), por una componente dextral en el punto donde esta interactúa con la Falla Los Santos.

Figura 45. Fotografía tomada en el Sector Río Sogamoso (SeRS). Se observa el plano de la Falla del Suárez de buzamiento NO, poniendo en contacto a la Formación Girón (Jg) con las Formaciones Los Santos (K1ls) y Rosablanca (K1r).



Por otra parte, la mayoría de los datos de planos estriados tomados en el Sector Girón (SeG) asociados a la Falla del Suárez, reflejan una cinemática inversa de tipo de sinestral. De acuerdo a lo anterior, se plantean dos posibles explicaciones a este cambio en la componente de rumbo de la falla para el norte de la zona de estudio. La primera posibilidad es que la Falla del Suárez, además de lo planteado en el párrafo anterior, sufra un cambio y vuelva a adquirir la componente sinestral registrada para las zonas al sur, fuera del área de estudio. La segunda posibilidad es que en la parte norte de la zona son pocos los afloramientos conservados y se encontró una escasa cantidad de planos estriados (10), haciendo que el análisis del SeG no sea estadísticamente confiable para poder definir la cinemática de la estructura.

Figura 46. Panorámica tomada en la vereda Soracá (Municipio de Girón), donde se observa el plano de la Falla del Suárez poniendo en contacto a la Formación Girón (Jg) sobre el Miembro Órganos (Qbo) de la Formación Bucaramanga.

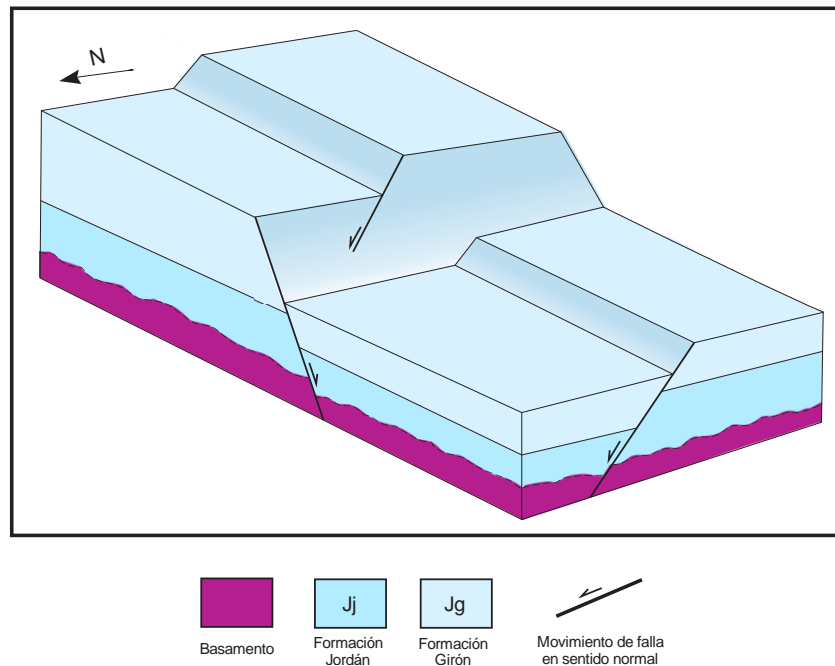


11.2. EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

Durante el Jurásico tardío-Cretácico temprano, se inicia la formación de diferentes cuencas segmentadas por fallas transversales y longitudinales a la orientación de las estructuras principales (Figura 47) como la Falla Los Santos y Falla del Suárez, respectivamente. Estas estructuras controlan la distribución de facies de las unidades

depositadas durante esta época (Formación Jordán (Jj), Formación Girón (Jg) y Formación Los Santos (K1Ls)) caracterizadas por un ambiente de afinidad continental. En el periodo comprendido entre el Berriasiano tardío y Maastrichtiano temprano durante la fase de subsidencia termal de las cuencas (Fabre, 1983; Cooper *et al.*, 1985), inicia el depósito de una secuencia de afinidad oceánica representada por las Formaciones Rosablanca (K1r), Paja (K1p), Tablazo (K1t), Simití (K1s), La Luna (K2l) y Umir (K2u).

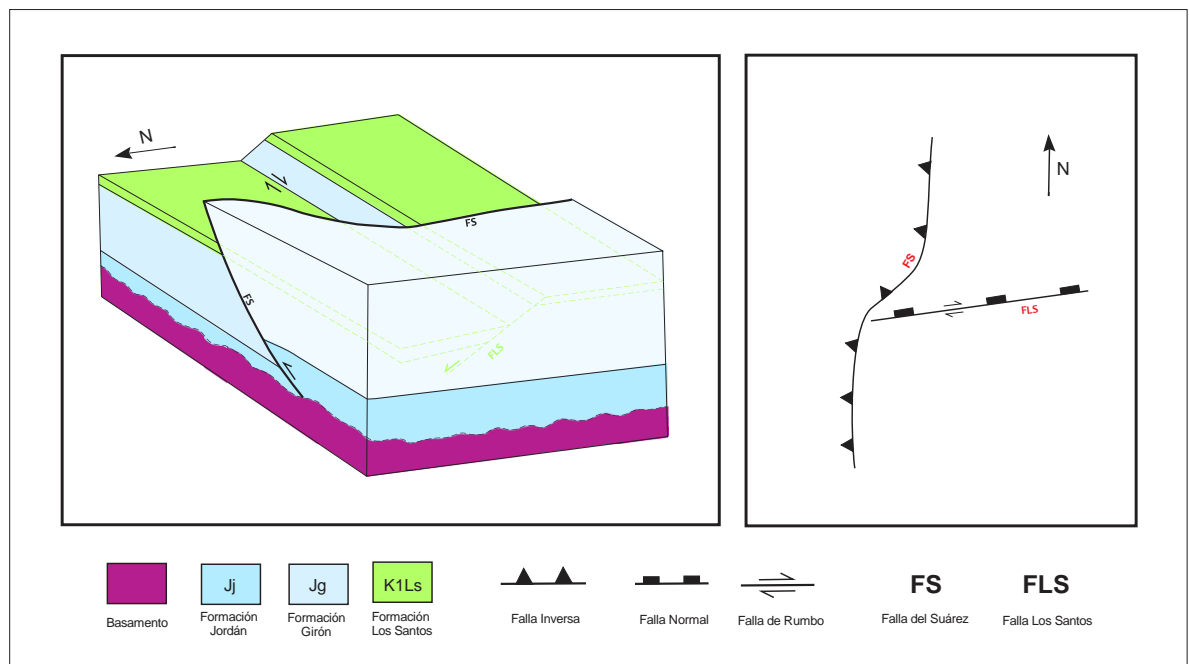
Figura 47. Bloque diagrama ilustrativo de la zona de estudio para el Jurásico tardío - Cretácico temprano.



Durante el Maaschtristiano-Paleoceno, la tectónica de la zona cambia hacia un régimen compresivo condicionado por la acreción de bloques al borde occidental del continente (Toussaint, 1993; Sarmiento, 2001; Cediél *et al.*, 2003; Bayona *et al.*, 2013; Mora *et al.*, 2013), iniciándose un proceso de inversión tectónica para el Oligoceno (Mora *et al.*, 2013) que concluyó con la acreción del bloque Chocó en el Mioceno medio – Pleistoceno

(Cooper *et al.*, 1995; Taboada *et al.*, 2000; Cortés *et al.*, 2005). Para este periodo de acortamiento, la Falla del Suárez, una estructura orientada en sentido NNE-SSO, sufre la reactivación e inversión de su cinemática, avanzando hacia el este, hasta truncarse con la Falla Los Santos, donde esta última ejerce el rol de rampa lateral generando un cambio de rumbo (NE-SO) en el trazo de la Falla del Suárez (Figura 27 y Figura 48). Finalmente, durante el Cenozoico se da el depósito de tipo continental de las Formaciones Lizama (E1l), La Paz (E2l), Esmeraldas (E2e), Mugrosa (E2m), Colorados (N3c) y Real (N3r), y de unidades cuaternarias como la Formación Bucaramanga.

Figura 48. Bloque diagrama ilustrativo de la zona de estudio. Se muestra la influencia de la Falla Los Santos sobre la Falla del Suárez, evidenciando la curvatura en el rumbo de esta última. La imagen derecha muestra la vista en planta de ambas estructuras.



11.3. ZONAS TRANSVERSALES

Trabajos recientes sobre la geología estructural en el flanco oeste de la Cordillera Oriental y el Valle Medio del Magdalena (Osorio, 2016; Flórez y Núñez, 2016; Jaimes y López, 2015)

dan explicaciones con base en las zonas transversales a las diferentes estructuras que no muestran un estilo estructural típico de la zona de estudio (Estructuras con cambios de rumbo, fallas transversales, cabeceo de pliegues, entre otras). Sin embargo, en estos trabajos no se hace un estudio a fondo que permita definir y caracterizar estas zonas en el área.

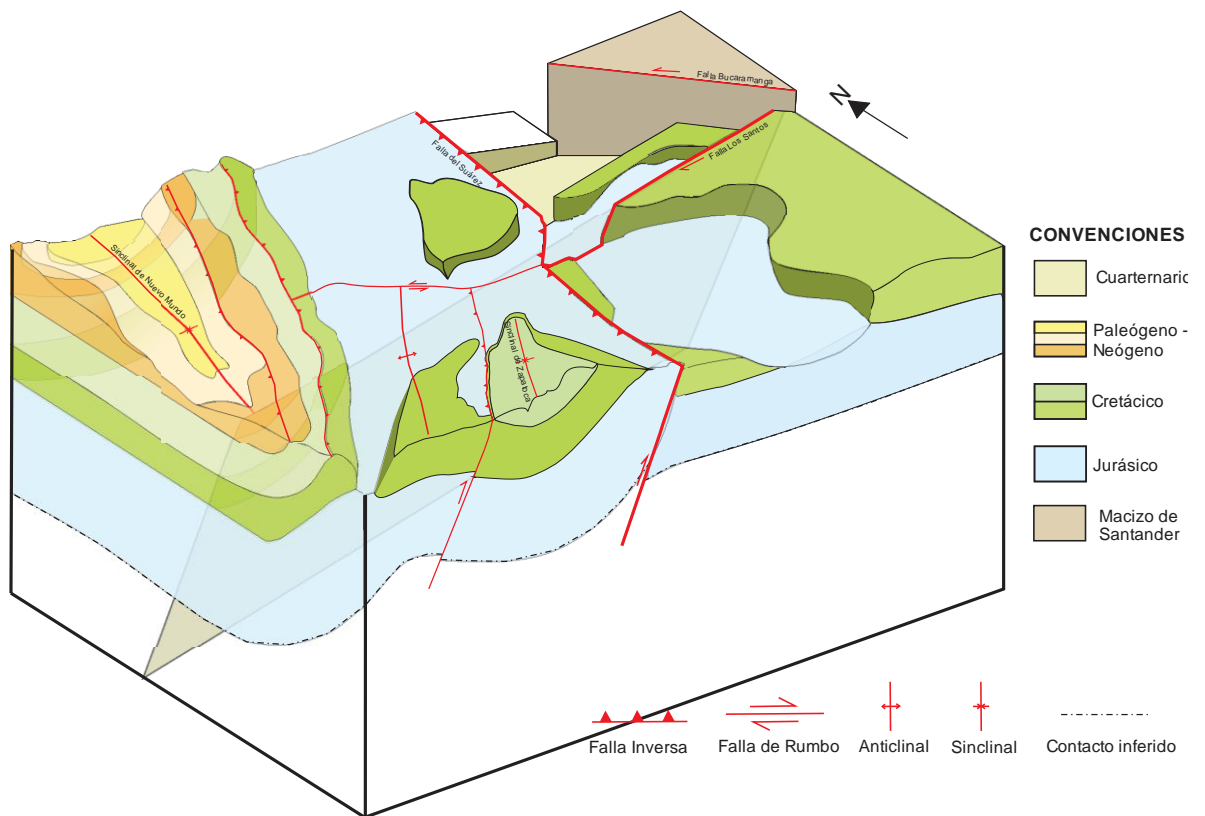
Figura 49. Curvatura de la Falla del Suárez en el Sector del Río Sogamoso. Se observa los trazos de la Falla los Santos (FLS) y de la Falla del Suárez (FS) (Color rojo), además de las Formaciones cartografiadas en la zona (Jg: Formación Girón, K1ls: Formación Los Santos, K1r: Formación Rosablanca).



Según lo definido por autores como Thomas (1990), Bayona *et al.* (2003) y Jiménez *et al.* (2012), se propone la presencia de una zona transversal que se extiende en dirección ENE–OSO, desde la Mesa de Los Santos hasta el sector Sur del Sinclinal de Nuevo Mundo

(Figura 48 y Figura 50). La zona transversal del área de estudio es evidenciada por la presencia de fallas de rumbo como la Falla Los Santos, cambios en el rumbo de estructuras, como sucede con el trazo de la Falla del Suárez (Figura 49), presencia de conectores laterales como la rampa lateral generada por la Falla Los Santos, y por último, el cabeceo de estructuras como el evidenciado en el Sinclinal de Nuevo Mundo y el Sinclinal de Zapatoaca.

Figura 50. Bloque diagrama ilustrativa a escala regional. Se observa la zona transversal planteada y las estructuras.

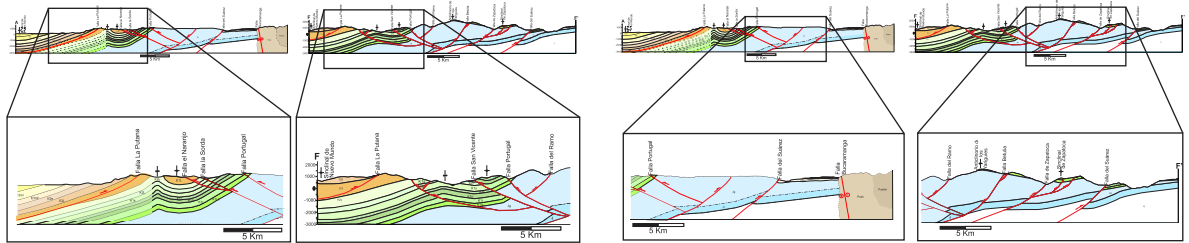


11.4. MODELO GEOLÓGICO

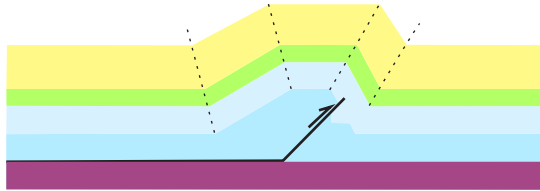
Con base en los cortes regionales realizados durante este proyecto, son observados dos estilos estructurales diferentes (Figura 30 y Figura 51). El primero, localizado al oeste del área de estudio, muestra una deformación de tipo *Thin-Skinned*, sustentada por sistemas de fallas inversas con vergencia al oeste las cuales presentan despegues en rocas del Cretácico y el Cenozoico. Estos despegues son evidenciados por la ausencia de rocas del Jurásico (e.g. Formación Girón), en los bloques colgantes de las fallas. El segundo estilo estructural corresponde al del área de estudio y muestra una deformación de tipo *Thick-Skinned*. Este tipo de deformación se encuentra asociado a fallas de alto ángulo que interactúan con el basamento (Burg, 2014). Para la zona, estas fallas se encuentran representadas por la Falla del Suárez, la cual corresponde a una estructura formada durante la época de extensión ocurrida durante el Jurásico-Cretácico temprano (Toussaint 1993; Cediel *et al.* 2003, Sarmiento, 2006) e invertida durante el periodo de acortamiento reportado para el Cretácico tardío-Paleógeno temprano (Toussaint, 1993; Cediel *et al.*, 2003, Sarmiento, 2006; Toro *et al.*, 2004; Mora *et al.*, 2006; Bayona *et al.*, 2013).

Esta inversión tectónica es evidenciada por las variaciones de espesor en unidades como la Formación Girón (Julivert, 1958), las cuales son representadas ilustrativamente en los cortes geológicos (Figura 29 y Figura 30). La Falla los Santos también representa estructuras que interactúan con el basamento. A diferencia de la Falla del Suárez, esta estructura no sufrió inversión durante la época de acortamiento debido a que solo se reactivan las fallas que presentan una orientación favorable con el nuevo tensor de esfuerzos (Caballero, 2013).

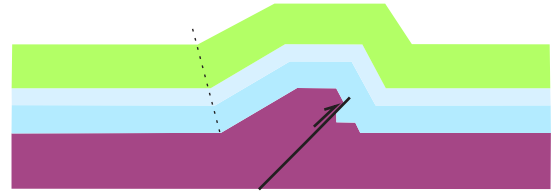
Figura 51. Estilos estructurales observados. A la izquierda, fuera de la zona de estudio, se muestra una deformación de tipo *Thin-Skinned* y a la derecha, en la zona de estudio, deformación de tipo *Thick-Skinned*.



Descamación Delgada (*Thin-skinned*):



Descamación Guesa (*Thick-Skinned*):



Fuente: Modificada de Burg (2014)

12. CONCLUSIONES

El lineamiento localizado al norte de la Mesa de Los Santos, sobre la Quebrada Los Montes, fue nombrado como Falla Los Santos y definido como una estructura de cinemática dextral con componente normal, cuya génesis es asociada al evento de extensión reportado para el Jurásico tardío – Cretácico temprano.

Se define una zona transversal que se extiende desde la Mesa de Los Santos hasta el sector sur del Sinclinal de Nuevo Mundo, evidenciada por la presencia de estructuras de rumbo como la Falla Los Santos, el cambio de dirección en el trazo de la Falla del Suárez, la presencia de una rampa lateral generada por la Falla Los Santos y el cabeceo del Sinclinal de Zapatoca y Nuevo Mundo.

La Falla del Suárez en la zona de estudio, es caracterizada como una estructura inversa de componente dextral y vergencia al este, la cual sufre un cambio de dirección en su rumbo generado a partir de la acción de la zona transversal definida para el área.

Se propone que la Falla del Suárez es una antigua estructura de cinemática normal, la cual sufre inversión durante la época de acortamiento registrada para Colombia (Maastrichtiano – Paleoceno).

Regionalmente se determinan dos estilos estructurales. El primero de tipo *Thin-Skinned* (Descamación delgada) definido hacia el oeste fuera de la zona de estudio, soportado por la presencia de fallas inversas de bajo ángulo que presentan su despegue en las unidades Cretácicas y Cenozoicas. El segundo, corresponde a una deformación tipo *Thick Skinned* (Descamación Gruesa), propuesto para la zona de estudio. Este estilo estructural es evidenciado por la presencia de fallas de alto ángulo de edades Jurásico tardío - Cretácico temprano, las cuales se infiere, afectan el basamento.

13. RECOMENDACIONES

Analizar a detalle las características del Sinclinal de Zapatoca, y el Sinclinal de Nuevo Mundo, además de otras estructuras que puedan estar afectadas por la posible zona transversal planteada en este trabajo.

Hacer un mayor estudio de la Falla del Suárez en la parte norte de su trazo, para analizar su interacción con los depósitos del Abanico de Bucaramanga y poder evidenciar su posible actividad neotectónica. Además, estudiar cómo es su interacción al norte con la Falla de Bucaramanga.

BIBLIOGRAFIA

Acosta, J., Lonergan, L., and Coward, M.P. 2004. Oblique transpression in the western thrust front of the Colombian Eastern Cordillera. *Journal of South American Earth Sciences*, 17, pp. 181–194.

Anderson, E. M. 1951. The Dynamics of Faulting. In: *Dynamics of Faulting* by E. M. Anderson. Geological London, Special Publications, 367: 231-246.

Angelier, J. 1994. Fault slip analysis and paleostress reconstruction. Chapter 4, in *Continental deformation*, P. L. Hancock, ed., Pergamon Press, Oxford, pp. 53-100.

Bayona, G., Thomas A. W., Van der Voo, R., 2003. Kinematics of thrust sheets within transverse zones: a structural and paleomagnetic investigation in the Appalachian thrust belt of Georgia and Alabama. *Journal of Structural Geology*, 25, pp. 1193-1212.

Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Caballero, V., Mahecha, H., Lamus, F., Montenegro, O., Jimenez, G., Mesa, A., and Valencia, V. 2013. Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos Basin; response to Caribbean-South American convergence in early Paleogene time. *Geological Society of London, Special Publications*, 377, pp. 31.

Burg, J. 2014. *Structural Geology and Tectonics: Paleo-“Stress” Analysis from Fault Data*. ETH Zürich and Universität Zürich.

Caballero, V., Parra, M., and Mora, A. 2010. Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío – Oligoceno temprano: proveniencia sedimentaria en

el sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca Valle Medio del Magdalena. Boletín de Geología Vol. 32, N°1, Enero-Junio de 2010. p 45-77.

Caballero, V., Parra, M., Mora, A., López, C., Rojas, E., and Quintero, I. 2013. Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick skin orogens: A case study in the Magdalena Valley, Colombia. In: Thick Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion (Editado por Nemčok, M., Mora, A.R., y Cosgrove, J.W.). Geological Society, London, Special Publication, 377: 343-367.

Cediel, F. 1968. El Grupo Girón, una molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental. Boletín Geológico, 16(1-3): 5-96.

Cediel, F., Shaw, R. P., and Caceres, C. 2003. Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum- Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, pp. 815- 848.

Cetina, L. M., y Patiño, H. A. 2013. Determinación de los tensores de esfuerzos asociados a la evolución del flanco oeste del Anticlinal de Los Cobardes, Santander. Trabajo de grado Geología. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. 182 p.

Cooper, M.A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R.H., Hayward, A. B., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., and Taboada, A. 1995. Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. AAPG Bulletin, 79: 1421-1443.

Cortés, M., Angelier, J., and 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.

Díaz, G., y Suarez, M. 1998. Evidencias neotectónicas de la Falla del Suárez en su confluencia con el sistema de Fallas de Bucaramanga. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 190p

Diederix, H., Hernández, C., Torres, E., y Botero., P. 2008. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. INGEOMINAS, Bogotá, Colombia. Informe interno, pp.145.

Diederix, H., Hernández, C., Torres, E., Osorio., J., y Botero., P. 2009. Resultados preliminares del primer estudio paleosismológico a lo largo de la Falla Bucaramanga, Colombia. *Memorias Congreso Colombiano de Geología*, vol. 9(2), pp. 18-23. Paipa, Boyacá

Etayo - Serna, F. 1968. El sistema Cretáceo en la región de Villa de Leiva y zonas próximas: *Geología Colombiana*, 5: 5-74.

Fabre, A. 1983. La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario. Segunda parte: esquema de evolución y tectónica. *Geología Norandina*, 8: 21-28.

Faulds, J., and Varga, R. 1998. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes. *Geological Society of America Special Papers*, 323: 1-45.

Flórez, S., y Nuñez, A. 2016. Análisis cinemático y estilo estructural de la Falla del Suárez entre el Hato y La Fuente, Santander. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 150 p.

Fossen, H. 2010. *Structural Geology*. Cambridge University Press, New York. 481 p.

Goldsmith, R., Marvin R. F., and Mehnert, H. H. 1971. Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *Geological Survey Research, Paper 750-D*, pp. D44-D49.

Gómez, E., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Hegarty, K., Kelley, S. 2005. Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena valley basin of Colombia and implications for exhumation of the northern Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 117: 547-569.

Hettner, A. 1892. Die Kordillere von Bogotá, Gotha, Paternans Mitteil; 22, 131 p. *Erganzungsheft*.

Ingeominas. 2001. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga.

Irving, E., 1971. La evolución estructural de los Andes más septentrionales de Colombia. *Boletín Geológico*, 19(2): 1-89.

Jaimés, E., y López, O. 2015. Contribución al conocimiento geológico del sector sureste de la plancha 120-III-C, Valle Medio del Magdalena. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 120 p.

Jiménez, G., Rico, J., Bayona, G., Montes, C., Rosero, A., and Sierra, D. 2012. Analysis of curved folds and fault/fold terminations in the southern Upper Magdalena Valley of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 39: 184 – 201.

Julivert, M. 1958. La morfoestructura de la zona de mesas al SW de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, 1:9-43.

Julivert, M. 1961. Geología de la Vertiente W de la Cordillera Oriental en el Sector de Bucaramanga (Colombia, Sud-América). *Boletín de Geología*, 8(2): 35-43.

Julivert, M. 1963. Nuevas observaciones sobre la estratigrafía y tectónica del cuaternario de los alrededores de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, 8(2): 35-43.

Julivert, M., y 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). *Boletín de Geología*, 15: 41-59.

Julivert, M., Barrero, D., y Navas, J. 1964. Geología de la Mesa de Los Santos. *Boletín de Geología*, 18: 5-11.

Langenheim, R.L. 1954. Preliminary report on the stratigraphy of the Girón Formation in Santander and Boyacá. *Boletín de Geología*, (3): 35-50.

Laverde, F., y Clavijo, J. 1985. Análisis facial de la Formación Los Santos, según el corte de «Tu y Yo» (Zapatoca). Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales, Ingeominas, 16 (VI): 1-9.

López, E., and Barrero, A. 2002. Cross section 2 – Puerto Wilches to Arauca Field, in: Upper crust models of Colombia, Chapter 2 Deformed continental crust, Eastern Colombia. INGEOMINAS.

McKenzie, D. 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. Earth and Planetary Science Letters, 40: 25-32.

Martínez, R., y Nieves, K. 2015. Apoyo técnico para la revisión excepcional de los planes de esquema de ordenamiento territorial de los municipios localizados en la zona de embalse del proyecto Hidroeléctrico Sogamoso. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

Marrett, R., and Peacock, C.P. 1999. Strain and stress. Journal of Structural Geology, 21: 1057-1063.

Mojica, J., y Kammer, A. 1995. Eventos Jurásicos en Colombia. Geología Colombiana, 19: 165-172.

Mora, A., Parra, M., Strecker, M.R., Kammer, A., Dimate, C. and Rodriguez, F. 2006. Cenozoic Contractual Reactivation of Mesozoic Extensional Structures in the Eastern Cordillera of Colombia. Tectonics, 25.

Moreno, C., Horton, b., Caballero, v., Parra, M., and Sierra, J. 2011. Depositional and provenance record of the Paleogene transition from foreland to hinterland basin evolution during Andean orogenesis, northern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 32: 246-263.

Navas, J. 1962. Geología del Carbonífero al N de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, 11: 23-34.

Osorio, D. 2016. Estratigrafía y deformación del Grupo Girón en el Anticlinorio de los Yariguíes (“Anticlinal de los Cobardes”) sectores Zapatoca y Río Lebrija. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. 173 p.

Paris, G., y Sarria, A. 1988. Proyecto Geofísico del Nordeste Colombiano. Cali. INGEOMINAS, pp. 48.

Paris, G., y Romero, J. 1993. Fallas activas en Colombia. Ingeominas, Cali, 45 p.

Paris, G., Machette, M.N., Dart, R.L., and Haller, K.M. 2000. Map and Database of Quaternary Faults in Colombia and its Offshore Regions. U.S Geological Survey Open-File Report 00-018, 61, p. 1 plate (1:2.000.000 scale).

Pinto, J., Clavijo, J., Gómez, S., Gutiérrez, D., Mora, J., Rojas, N., Adarme, I., Aldana, S., Contreras, N., Díaz, E., Melo, L., Tarazona, G., Rincón, M., Vargas, C., Morales, C., Velandia, F., Hincapié, G., Forero, H., Duarte, R., Vargas, M., Bermoude, O. 2007. Investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos, Sector Nordeste de Curití y borde

occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander. Informe Interno INGEOMINAS, Bogotá, 363 p.

Price, N. J., and Cosgrove, J. W. 1990. Analysis of geological structures. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press, 502 p

Pulido, O. 1979. Geología de las planchas 135 de San Gil y 151 de Charalá; Departamento de Santander. Boletín Geológico, 23 (2): 39-78.

Royero, J. M., y Clavijo J. 2001. Memoria Explicativa del Mapa Geológico del departamento de Santander. INGEOMINAS.

Sarmiento-Rojas, L.F., Van Wess, J. D., and Cloetingh, S. 2006. Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models, J. S. am. Earth Science, 21:383-411.

Schneider, J.F., Pennington, W. D., Meyer, R. P., 1987. Microseismicity and Focal Mechanisms of the Intermediate-Depth Bucaramanga Nest, Colombia. Journal Of Geophysical Research, 92: 13913-13926.

Taboada, A., L. A. Rivera, A. Fuenzalida, A. Cisternas, H. Philip, H. Bijwaard, J. Olaya, and C. Rivera. 2000. Geodynamics of the northern Andes: Subduction and intracontinental deformation (Colombia), Tectonics, 19, 787 – 813.

Tellez, N. 1964. Geología de la Mesa de Barichara. Boletín de Geología, 18: 12-21.

Toro, J., Roure, F., Bordas-Le Floch, N., Le Cornec-Lance, S., and Sassi, W. 2004. Thermal and kinematic evolution of the Eastern Cordillera fold and thrust belt, Colombia, in R. Swennen, F. Roure, and J. W. Granath, eds., *Deformation, fluid flow, and reservoir appraisal in foreland fold and thrust belts: AAPG Hedberg Series, no. 1*, p. 79– 115.

Thomas, A. 1990. Controls on locations of transverse zones in thrust belts. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 83 (3): 727-744.

Toussaint, J. F., 1993. *Evolución Geológica de Colombia, Precámbrico – Paleozoica*. Pub. Universidad Nacional de Colombia, 229 p.

Ulloa, C., Rodriguez, E., Rodriguez, G. I., 2003. Memoria explicativa de la Geología de la plancha 172, Paz de Río. INGEOMINAS.

Vargas, G., y Niño, A. 1992. Patrones de fracturamiento asociados a la Falla de Bucaramanga. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

Ward, D. E., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo H., Gomez, E. 1973. Geología de la Plancha 120, Bucaramanga, INGEOMINAS.

Zeeb, C., Gomez-Rivas, E., Bons, P and Blum, F. 2013. Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrops. *The American Association of Petroleum Geologists*, 9 (97): 1545–1566.

Nota: ver anexos adjunto en la carpeta