

Análisis de la cinemática en las principales estructuras localizadas en la zona norte del
Anticlinorio de los Yarigués, flanco Oeste de la Cordillera Oriental

Sara María Sánchez García

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Director

Giovanny Jiménez Díaz

Geólogo, PhD

Codirector

Yesid Paul Goyes Peñafiel

Geólogo, PhD (c)

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios por todas las oportunidades brindadas.

*A mis padres Myriam y Tito por apoyarme incondicionalmente en todo el proceso y ser
mi inspiración.*

A mis hermanos Ximena y Titin por ser mi soporte en todos los momentos de mi vida.

*A mi sobrino Nico por ser mi confidente, mi inspiración, por compartir el amor por las
rocas y las ganas de aprender constantemente sobre esta ciencia.*

A mis primas Ang y Mila por ser mi compañía y por estar siempre presentes.

A Herika que sin importar la distancia fue mi guía y creyó en mi potencial.

A Santi y Juanse por ser mi motivación.

*A Mai que ha estado en situaciones complicadas, por su comprensión y por ser una voz
de apoyo y de aliento.*

*A mis amigos y compañeros de pregrado de Bucaramanga y Medellín con los cuales
compartí historias y vivencias que recordaré con cariño y agradecimiento.*

*A todas las personas que he conocido que han dejado una huella en mí, por sus consejos
y enseñanzas.*

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco al proyecto 110287780668 titulado “Modelo sismotectónico de la región centro oriente del Valle Medio del Magdalena como insumo al conocimiento de los modelos de exploración y desarrollo de campos de hidrocarburos”, financiado a través del acuerdo 785-2019 entre la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), MINCIENCIAS y el Fondo Francisco José de Caldas, por su apoyo en la realización de la investigación y el financiamiento de todo el proceso.

Quiero agradecer a mi director de tesis, el profesor Giovanny Jiménez Díaz, por brindarme la confianza, las palabras de motivación, su paciencia, sus invaluable consejos, su disposición de ayuda y entusiasmo para llevar a buen término la investigación.

A mi Codirector Yesid Paul Goyes Peñafiel, por ser mi guía a lo largo de la investigación, por ayudarme a superar los obstáculos, por los consejos, la paciencia y toda la disposición prestada para que día a día se alcanzaran los objetivos propuestos.

A los calificadores del proyecto, profesor Dilan Arturo Martínez Sánchez y profesora Angélica Álvarez Naranjo por sus comentarios y contribuciones que ayudaron a mejorar el proyecto.

Al profesor Francisco Velandia, que desde quinto semestre ha sido un referente para mí en la carrera, por enseñarme a ver más allá de las cosas, por todas las salidas de campo en las que adquiriré conocimientos, por darme la oportunidad de hacer parte del proyecto y por la confianza puesta en mí.

Agradecer a toda mi familia, mis padres Myriam y Tito, mis hermanos Titin y Xime, mi sobrino Nico, mis primos, a Ang, Mila, Liyer, Santi, Juanse, Herika y Elsy a mis tías y tíos, a

Robin y Yeni, ya que cada uno de ellos ha aportado cariño, amor y me han dado las fuerzas necesarias para continuar.

A Angie Uribe por su apoyo en conceptos relacionados con la disciplina, por darme motivación por la investigación, por el conocimiento y mostrarme que los sueños se pueden hacer realidad, también por ser un referente importante en compañerismo y amistad. A Laura que me ha dado palabras de motivación y por su apoyo incondicional en todo el proceso.

A Ana González por sus consejos, su comprensión, por su apoyo, por todas las recomendaciones y la paciencia que ha tenido como amiga y compañera.

A Maira por todo el apoyo, sus palabras llenas de luz y amor que me motivan día a día a cumplir mis sueños y a persistir y resistir ante los obstáculos que se puedan presentar en la vida, por su acompañamiento.

A Johanna y Katherin que me acompañaron en los primeros años en la carrera. A Drama Queens que fueron parte muy importante para mí en la universidad por su amistad leal y llena de comprensión y cariño, a Sofía Ariza mi compañera de los campos, a Karoll Zúñiga que ha sido mi consejera, Nicolle Aza y Angie Pisciotti por escucharme y brindarme protección. A Maracumix y al grupo de los Pollos Hermanos. A Mafe que en todo momento confío en mí, la amiga que nunca ha dudado de mí, que tuve el privilegio de conocer y que desde ese momento ha estado en todas las situaciones que se han presentado en mi vida. A Karen, Paola, Anita, Angie, Dana, Eduardo, Karol, Diego, Andrés, Inti, Kevin, Ronald, Sergio, Sharon, David, Laura, Olga, Jay, Valeria, Astrid, Lina, Juli, Jesús, Ximena, Peter, Simón y amigos que me permitieron compartir experiencias y conocimientos.

A Bredman por su apoyo en campo, su paciencia y por darme motivación y sonrisas cada día en la salida. A Jorge, Ricardo y Óscar que nos apoyaron con el transporte. A Paula del proyecto CPS por toda la colaboración brindada.

A todos los profesores de la Universidad, tanto del ciclo básico, como los profesores de la escuela de geología que generaron en mí un amor por la disciplina. A mi profesor de colegio John Freddy que me enseñó la empatía, el análisis y todo lo relacionado con competencias ciudadanas. A la profe Laura de Club de Lectura que me ayudó a incursionar en un mundo de imaginación, valentía y amor propio. A todas las profesionales que conocí en Geolatinas que generaron en mí confianza, seguridad y ganas de incursionar en nuevos entornos de la geología.

A la Universidad Industrial de Santander por darme un entorno seguro, en el que sentí apoyo y por generar espacios como el club de lectura.

A Martica, Rosita y César por su cordialidad en el desarrollo de las actividades y por el apoyo en los inconvenientes que se presentaron a lo largo de la carrera.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Justificación y planteamiento del problema.....	16
2. Objetivos	18
2.1 Objetivo General.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3. Marco Teórico.....	19
4. Metodología	23
4.1. Fase 1: Identificación de litologías y fallas en el área de estudio, y determinación de las cinemáticas por medio de indicadores cinemáticos como las estrías de fallas	23
4.2. Fase 2: Determinación de la vergencia de las estructuras, estilo estructural y modelación de las unidades de roca basados en datos cartográficos y cortes geológicos.....	24
4.3. Fase 3: Elaboración de un mapa síntesis con la revisión cartográfica y cortes geológicos donde se muestren los estilos estructurales de la zona de estudio	24
4.4. Elaboración del informe.....	25
5. Resultados	25
5.1. Identificación de litologías y fallas en el área de estudio, y determinación de las cinemáticas por medio de indicadores cinemáticos como las estrías de fallas	25
5.1.2. Reconocimiento mediante sensores remotos del área de estudio para determinar las rutas y/o vías de acceso necesarias en la definición del trazo de las secciones transversales.	25
5.1.3. Ejecución del trabajo de campo	28
5.1.4. Descripción de litologías, recolección de datos estratigráficos, identificación de las estructuras principales y de segundo orden, medición de los planos axiales de los pliegues, planos de fallas, clivajes, diaclasas, e interpretación inicial de la cinemática de las fallas	29
5.1.5. Establecimiento de unidades geológicas y comparación con las descripciones de la bibliografía, para identificar las Formaciones que afloran en el flanco frontal del Anticlinorio de los Yariguíes.	29
5.2. Determinación del campo de esfuerzos y definición de la elipse de deformación de la zona y el modelo de evolución de las unidades de roca y fallas basados en datos cartográficos y cortes geológicos	32
5.2.1. Determinación de los tipos de estructuras presentes en el área de estudio	32
5.2.1.1. Fallas. En el estudio geológico de la transecta Girón-Lebrija-Aeropuerto, se identificaron fallas de rumbo dextrales con componentes normales y algunas netas de rumbo en la zona 1. Sobre los valores de pitch en las fallas, son predominantemente bajos, con un promedio de 10 grados (Figura 10 y Figura 11).	33
5.2.1.2. Pliegues. La zona de estudio también ha sido afectada por diferentes eventos tectónicos	

que han deformado las rocas de forma dúctil. En el estudio se encontraron clivajes, algunos en capas incompetentes y otros con tendencia casi E-W (Figura 12). En una de las estaciones en inmediaciones del municipio de Betulia, zona 3, se encontró un pliegue parásito o pliegue de segundo orden correspondiente a una S. Hacia el W de la zona 2, se encontró un pliegue de segundo orden correspondiente a una Z.....	35
5.2.1.3. Diaclasas. En la Figura 13 se presenta la densidad de polos de las familias de diaclasas en las zonas 1, 2 y 3. Se observa una familia principal de diaclasas con una orientación aproximada de $340^{\circ}/82^{\circ}$ en la zona 1 y zona 3. Esta concentración de diaclasas muestra una continuidad a lo largo de la estructura del Anticlinorio de los Yariguíes de N a S en el área de estudio. Sin embargo, en la zona 2, donde se encuentra el Río Sogamoso, no se aprecia la misma tendencia, en esta área se tiene una familia de diaclasas 044/87, cambiando así el rumbo de esta familia principal de estas fracturas comparada con la zona 1 y 3, pero conservando el buzamiento de la familia principal en cada una de las zonas.	36
5.2.2. Definición del campo de esfuerzos y la elipse de deformación de la zona de estudio.	37
5.2.2.1. Procesamiento de diaclasas. Se procesan los datos de diaclasas por zona considerándolos de “tensión (T)”. En la zona 1 (N = 103) la familia principal del diaclasamiento está entre 100° y 110° , con familias secundarias principales a 30° - 40° y a 165° aproximadamente, además de familias menores entre 60° y aprox. 140° que podrían formar un ángulo de cizalla. En la zona 1 (Figura 15), se tiene una estabilidad relacionada con los tensores obtenidos, lo que indica que desde su exhumación no se han presentado cambios importantes en la rotación de esta zona.	39
5.2.2.2. Tensor de esfuerzos general para estrías de fallas.....	43
5.2.2.3. Elipse de deformación.....	45
5.2.3. Definir el tipo de modelación según la litología y el régimen de esfuerzos, inclinación y tipos de fallas respectivamente. Esta actividad ayudará en la realización de los cortes de la siguiente fase.....	46
5.3. Elaboración de un mapa síntesis con la revisión cartográfica y cortes geológicos donde se definen los estilos estructurales de la zona de estudio.....	48
5.3.1. Organizar los datos recolectados en campo en tablas de si se tratan de datos estructurales o de estratigrafías y de las estructuras.....	48
5.3.2. Establecer un sistema de coordenadas para el trabajo en el software y cartografía base.	48
5.3.3. Ingresar los datos recolectados en campo en el software ArcGIS. Trazar los contactos litológicos, las líneas de charnela de los pliegues y las líneas de falla con ayuda de la geomorfología y la dirección (trend) y el cabeceo (plunge). Realizar el mapa.	48
5.3.4. Realizar tres cortes geológicos, perpendiculares a las estructuras, con la información determinada en la Fase 1 y 2, la estratigrafía, estructuras y cinemáticas de las estructuras, estilo estructural, modelación y la vergencia de estructuras.	50
6. Discusión.....	54
7. Conclusiones.....	57
8. Recomendaciones	58
Referencias Bibliográficas	59

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Procesamiento de estrías de falla	43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización del área de estudio	14
Figura 2. Mapa tectónico regional actualizado del área de estudio	20
Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio en el Anticlinorio de los Yariguíes	22
Figura 4. Mapa geológico del área de estudio	27
Figura 5. Mapa de las estaciones de campo en el área de estudio	28
Figura 6. Afloramientos (Grupo Girón).....	30
Figura 7. Mapa de las zonas con las proyecciones estereográficas de diaclasas, fallas y pliegues.....	33
Figura 8. Análisis de tendencias de fallas de la zona de estudio.	34
Figura 9. Análisis de tendencias de pliegues de la zona de estudio.....	35
Figura 10. Análisis de tendencias de diaclasas de la zona de estudio.....	36
Figura 11. Mapa de los tensores de diaclasas y estrías de falla de las zonas del área de estudio ..	38
Figura 12. Tensores de esfuerzos de las diaclasas zona 1.....	39
Figura 13. Círculo de Mohr	40
Figura 14. Tensores de esfuerzos de las diaclasas zona 2.....	41
Figura 15. Tensores de esfuerzos de las diaclasas de la zona 3	42
Figura 16. Tensores de esfuerzos de estrías de falla.....	44
Figura 17. Elipse de deformación de la zona de estudio.....	45
Figura 18. Esquema fallas.....	47
Figura 19. Mapa geológico Zona Norte del Anticlinorio de los Yariguíes	49
Figura 20. Corte geológico Anticlinorio de Los Yariguíes (Sección A-A').....	51
Figura 21. Corte geológico Anticlinorio de Los Yariguíes (Sección B-B')	52
Figura 22. Corte geológico Anticlinorio de Los Yariguíes (Sección C-C')	53

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el repositorio institucional

Apéndice A. Mapa de secciones del área de estudio

Apéndice B. Datos de campo

Apéndice C. Coordenadas de las estaciones de campo

Apéndice D. Mapa de las estaciones de campo en el área de estudio

Apéndice E. Datos de Campo

Apéndice F. Fósiles

Resumen

Título: Análisis de la cinemática en las principales estructuras localizadas en la zona norte del Anticlinorio de los Yariguíes, flanco Oeste de la Cordillera Oriental^{1*}

Autor: Sara María Sánchez García^{2*3*}

Palabras Clave: Anticlinorio, estructuras, fallas, cinemáticas, Grupo Girón, Jurásico, cizalla, rotación

Descripción: El Anticlinorio de los Yariguíes se muestra como un modelo idealizado donde las capas son concordantes al rumbo de la estructura, con un régimen estructural compresivo y sin desplazamientos, como se indica en mapas y cortes realizados en la zona de estudio. No obstante, en observaciones realizadas en el flanco Oriental del Anticlinorio de los Yariguíes se evidencia que en el flanco frontal hay estructuras menores que son oblicuas y que no coinciden con la cinemática esperada en la zona, por lo que se proponen que son las fallas normales del Jurásico, las cuales fueron reactivadas, las responsables de este comportamiento. Con base en la revisión cartográfica, identificación de litologías y fallas en el área de estudio por medio de datos estructurales recolectados en campo, y determinación de las cinemáticas por medio de indicadores cinemáticos como estrías de fallas, la determinación de la vergencia de las estructuras, la elaboración de 3 cortes geológicos, y un análisis del campo de esfuerzos y la elipse de deformación de la zona de estudio, se obtuvo el estilo estructural y el esquema de evolución de la zona. Con los tres tensores obtenidos de los datos de diaclasas con un régimen de esfuerzos de extensión y el tensor de esfuerzos de datos estriados con un régimen de rumbo o cizalla de dirección NEE-SWW, considerando el tensor actual en esa dirección, se proponen que sistemas fallas normales del Jurásico, son las responsables de este comportamiento al ser reactivadas. A partir de los tensores de esfuerzos se respalda la hipótesis de que las fallas transversales se comportan como fallas reactivadas normales con componente de rumbo, sinestral o dextral principalmente, según su orientación, en las zonas donde hay un comportamiento anormal de los estratos del flanco oriental del Anticlinorio de los Yariguíes.

^{1*} Trabajo de Grado

^{2**} Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Giovanni Jiménez Díaz. PhD en Geociencias. Codirector: Yesid Paul Goyes Peñafiel. PhD (c) en Ciencias de la Computación.

Abstract

Title: Analysis of the kinematics in the main structures located in the northern zone of the Yariguíes Anticlinorium, western flank of the Eastern Cordillera^{4*}

Author(s): Sara María Sánchez García⁵

Key Words: Anticlinorium, structures, faults, kinematics, Giron Group, Jurassic, shear, rotation

Description: The Yariguíes Anticlinorium is shown as an idealized model where the layers are concordant to the course of the structure, with a compressive structural regime and without displacements, as indicated in maps and sections made in the study area. However, in observations made in the eastern flank of the Yariguíes Anticlinorium, it is evident that in the frontal flank there are minor structures that are oblique and do not coincide with the expected kinematics in the area, so it is proposed that the Jurassic normal faults, which were reactivated, are responsible for this behavior. Based on the cartographic review, identification of lithologies and faults in the study area by means of structural data collected in the field, and determination of the kinematics by means of kinematic indicators such as fault striations, the determination of the vergence of the structures, the elaboration of 3 geological sections, and an analysis of the stress field and the deformation ellipse of the study area, the structural style and the evolution scheme of the area were obtained. With the three tensors obtained from the data of joints with an extensional stress regime and the stress tensor of striated data with a NEE-SWW strike or shear regime, considering the current tensor in that direction, it is proposed that Jurassic normal faults systems are responsible for this behavior when reactivated. From the stress tensors it is supported the hypothesis that the transverse faults behave as reactivated normal faults with strike-slip, sinistral or dextral component mainly, depending on their orientation, in the areas where there is an abnormal behavior of the strata of the eastern flank of the Yariguíes Anticlinorium.

^{4*} Degree Work

⁵Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Giovanni Jiménez Díaz. Geosciences Ph.D. Co-director: Yesid Paul Goyes Peñafiel. Geologist, PhD (c) in Computer Sciences.

Introducción

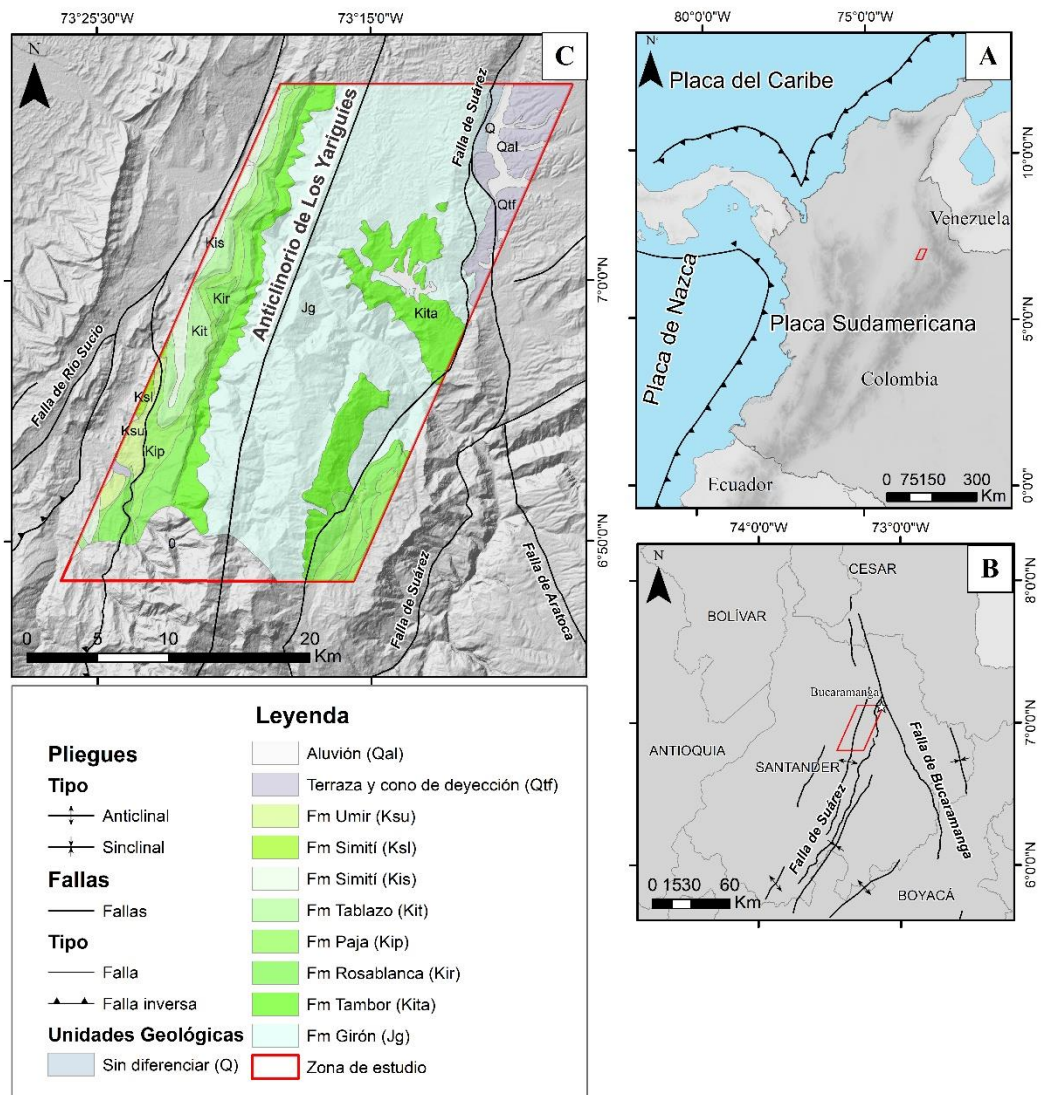
Estudios realizados en el Valle Medio del Magdalena (VMM) indican que, en el dominio Este, donde se ubica el Anticlinorio de los Yarigués, predomina un estilo de deformación thick-skinned (Jiménez *et al.*, 2016). El tipo de deformación thick-skinned o piel gruesa se caracteriza por fallas de cabalgamiento que afectan el basamento cristalino (Pfiffner, 2017). Las fallas del área de estudio son estructuras que presentan alto ángulo, con vergencia al este (Falla del Suárez y Zapatocha) y se evidencia que corresponden a fallas normales que por inversión tectónica en el Oligoceno Temprano-Mioceno han provocado cambios en los espesores de rocas Jurásicas como el Grupo Girón (Jiménez *et al.*, 2016).

La inversión tectónica inició en la Cordillera Oriental en el Oligoceno, en esta etapa de deformación se presentó rotación en sentido horario, donde las fallas transversales fueron límites estructurales y estratigráficos entre bloques deformantes (Jiménez *et al.*, 2022). En el Neógeno la Cordillera Oriental presentaba una fase de acortamiento en la que se involucran fallas transversales, inversiones y desplazamiento a lo largo de las fallas (Jiménez *et al.*, 2021). La reactivación de las fallas normales dentro de la Cordillera Oriental ocurrió bajo cizalla simple o sub-simple con componente dextral (Jiménez *et al.*, 2022), que se relaciona con el modelo de estilo dominó, mostrado por Velandia *et al.*, (2020), comprendido por la Falla de Bucaramanga (Figura 1B) y la Falla de Lebrija. Este estilo de dominó muestra bloques rotados para la zona del anticlinorio de los Yarigués (Velandia, 2020). Así mismo, otros autores han indicado rotaciones como Bayona *et al.*, (2006) en el área de Mesas, que reportó rotaciones de 90° aproximadamente para la Formación Jordán (Jiménez *et al.*, 2022). En el anticlinorio de los Yarigués se han

reportado rotaciones de 48° para las Formaciones del Jurásico y Cretácico Inferior (Jiménez *et al.*, 2021).

Figura 1

Mapa de localización del área de estudio



Nota. A. Tectónica del margen noroeste de Suramérica. B. Estructurales regionales (Departamento de Santander, Colombia). C. Unidades geológicas y estructuras principales del área de estudio.

Las fallas de El Medio y San Vicente, localizadas al Oeste del Anticlinorio de los Yariguíes (Figura 1C) despegan a profundidad del Sistema de Fallas La Salina (Jiménez *et al.*, 2016). En esta zona se encuentra una estructura regional denominada como el Anticlinorio de los Yariguíes, la cual es una estructura con rumbo NE-SW y se encuentra delimitado por la Falla del Suárez al este, al norte por la Falla de Bucaramanga y fallas menores, Falla de San Vicente, La Parroquia, Cútiga, El Medio y Río Chucurí al oeste (Osorio y Velandia, 2021).

En el flanco Frontal del Anticlinorio de los Yariguíes aflora una secuencia de rocas de ambientes continentales, fluvial y aluvial, principalmente corresponden al Grupo Girón de edad Jurásico Tardío a Cretácico Inferior (157-139 Ma) (Jiménez *et al.*, 2021). El Grupo Girón fue propuesto por Etayo-Serna (1989) y lo conforman la Formación Angostura del Río Lebrija de edad entre el Kimmeridgiano Temprano y el Tithoniano temprano (157-146,5 Ma) y la Formación Los Santos de edad Berriasiana entre el Tithoniano y Valanginiano (146,5-139,3 Ma) (Jiménez *et al.*, 2021). El Sistema de Fallas La Salina-Bituima, correspondientes a fallas transtensionales, y por el desplazamiento de fallas normales ocasionaron cambios en el espesor del Grupo Girón (Jiménez *et al.*, 2016). En el flanco Frontal del Anticlinorio de los Yariguíes afloran otras rocas como las de la Formación Jordán del Jurásico Temprano, cercano al límite Triásico- Jurásico (201,3 ±Ma) (Cohen *et al.*, 2013; Alarcón *et al.*, 2020) y la Formación Rosa Blanca de un ambiente marino somero del Cretácico Inferior (Etayo y Guzmán, 2019).

Este trabajo propuso relacionar las cinemáticas de las estructuras que involucran la tectónica del área, las estructuras menores como pliegues y fallas, y la influencia que han tenido en la estratigrafía del flanco frontal del Anticlinorio de los Yariguíes. Con la realización de tres secciones transversales se recolectaron datos a partir de indicadores cinemáticos y datos

estructurales que permitieron determinar el modelo de deformación y las cinemáticas de estructuras en el Anticlinorio de los Yariguíes. Finalmente, la información y el análisis estructural se representaron en un mapa detallado y cortes geológicos.

1. Justificación y planteamiento del problema

El Anticlinorio de los Yariguíes se muestra como un modelo idealizado donde las capas son concordantes al rumbo de la estructura, con un dominio estructural de componente en buzamiento inverso y sin desplazamiento, por fallas de rumbo regionales, como se indica en mapas y cortes realizados en la zona de estudio por Ward *et al.*, (1973), Tesón *et al.*, (2013) y Caballero *et al.*, (2016) (Jiménez *et al.*, 2022). No obstante, en observaciones realizadas por Velandia (2017), y Jiménez *et al.*, (2021; 2022) en el flanco Oriental del Anticlinorio de los Yariguíes se evidencia que en el flanco frontal hay estructuras menores que son oblicuas y no coinciden con la cinemática esperada en la zona.

Las rotaciones horarias reportadas por Jiménez *et al.* (2021; 2022) sugieren que esta zona ha experimentado deformaciones de cizalla pura en los pliegues y cizalla simple o subsimple asociadas a las fallas reactivadas con componente dextral. Además, Jiménez *et al.* (2016) reporta un sistema de zonas de transferencia en el flanco oeste de la cordillera oriental. Por otra parte, Velandia (2017) indica el trazo de la Falla de Lebrija en el Anticlinorio de los Yariguíes por medio de un análisis geomorfológico. En cuanto a la Falla de Lebrija, es una estructura que presenta componente de rumbo y una cinemática lateral izquierda y, al ser paralela a la falla de Bucaramanga, explicaría la rotación de los bloques a partir de un modelo de dominó (Jiménez *et al.*, 2022). Otros estudios más recientes como el de Osorio y Velandia (2021) indican una

segmentación dada por estructuras transversales y fallas regionales como la Falla del Suárez, al igual que una rotación horaria del campo de esfuerzos relacionada con las fallas de Bucaramanga y Lebrija que generan transpresión en el área.

En este trabajo se plantea la hipótesis de que sean las fallas normales Jurásicas reactivadas las responsables de este comportamiento de los estratos que conforman el Anticlinorio de los Yariguíes. En este caso, se tienen unas estructuras, correspondientes a fallas normales, que controlaron la sedimentación previa al plegamiento y que se encuentran por todo el flanco oriental del Anticlinorio de los Yariguíes. Estas fallas normales por inversión tectónica pasarían a ser cabalgamientos con componentes en rumbo que provocarían una rotación en los bloques en sentido horario. En este modelo de deformación discontinua se afectaría la cubierta sedimentaria y el basamento no se encontraría deformado, es decir, se tratan de cabalgamientos en piel delgada o escamación delgada. Lo anterior explicaría la segmentación de la Falla del Suárez y la formación de pliegues oblicuos.

En este trabajo de investigación se analizará la cinemática de las estructuras, su influencia en la estratigrafía y se evidenciarán los componentes de rumbo que podrían explicar las rotaciones presentadas en la zona, lo anterior a partir de un análisis sistemático las estructuras del flanco frontal del Anticlinorio de los Yariguíes, así como los datos estratigráficos. Contribuyendo de esta manera a evidenciar el modelo dominó que se presenta en el Flanco Frontal del Anticlinorio de los Yariguíes y se extiende de manera regional, relacionado con la Falla de Bucaramanga, al igual que el control en la acumulación de depósitos en los espacios generados por el estilo dominó y las relaciones de las cinemáticas entre las fallas regionales y las transversales que controlaron la sedimentación y formación de depósitos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Analizar la cinemática de las principales estructuras localizadas en la zona norte del Anticlinorio de los Yariguíes, flanco Oeste de la Cordillera Oriental.

2.2 Objetivos Específicos

Identificar las litologías y fallas en el área de estudio, y determinar la cinemática por medio de indicadores cinemáticos como las estrías de fallas.

Determinar el campo de esfuerzos y definir la elipse de deformación de la zona y el modelo de las unidades de roca y fallas basados en datos cartográficos y cortes geológicos.

Elaborar un mapa síntesis con la revisión cartográfica y cortes geológicos donde se definan los estilos estructurales de la zona de estudio.

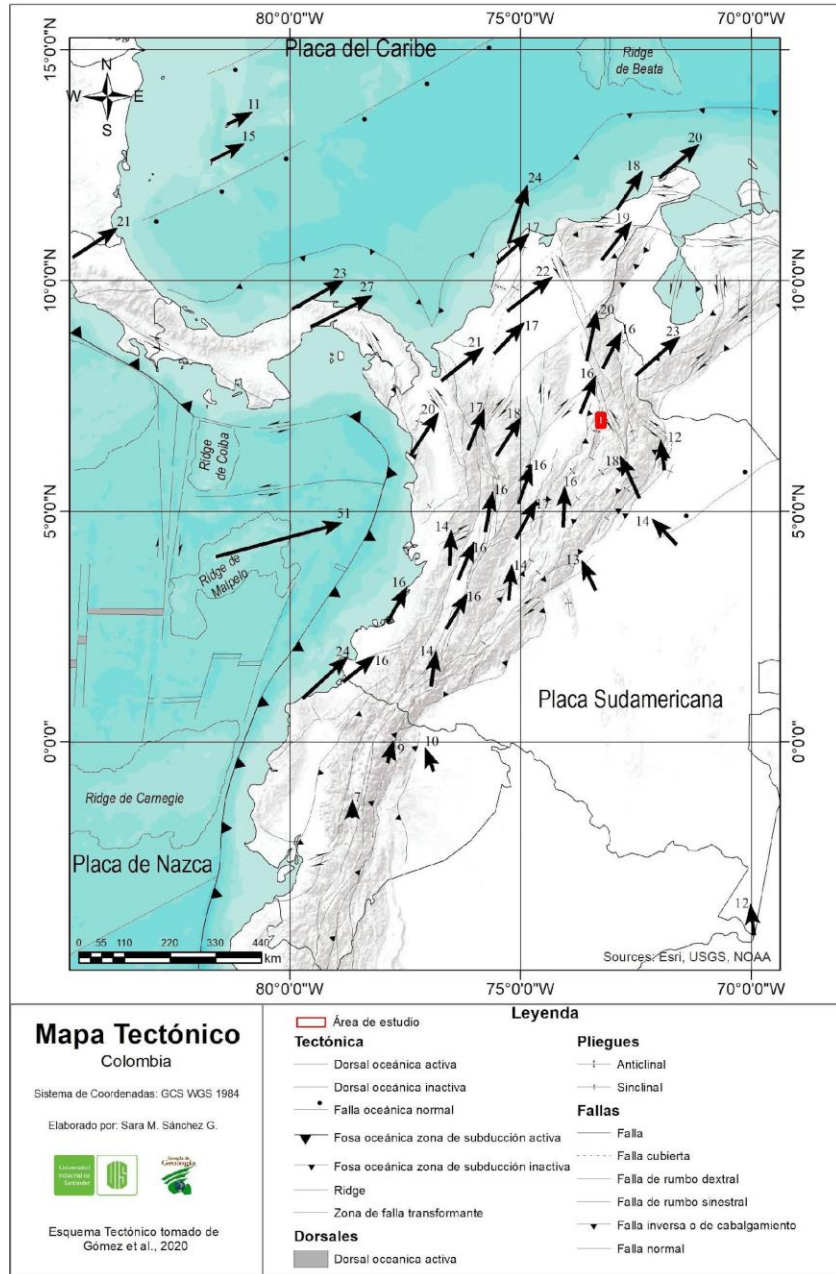
3. Marco Teórico

El Anticlinorio de los Yarigués, con orientación NNE-SSW, es una estructura regional que por procesos de deformación se encuentra altamente fallada y plegada. Las litologías que conforman la estructura corresponden a rocas sedimentarias de los periodos del Jurásico y Cretácico (Osorio y Velandia, 2021). La secuencia sedimentaria en el Anticlinorio tiene un estilo estructural con presencia de pliegues de primer orden que han deformado estas unidades (Moreno-Sánchez, 2019). Los estilos estructurales en el flanco oriental del Anticlinorio corresponden a una tectónica de piel gruesa, como se evidencia en el Sinclinal de Zapatoca, como indica Flórez *et al.*, (2016), el cual se trata de un pliegue conspicuo en el bloque colgante de la Falla del Suárez (Osorio y Velandia, 2021).

El Anticlinorio de los Yarigués se encuentra localizado en el flanco occidental de la Cordillera Oriental y es afectado por la evolución geológica y los eventos tectoestratigráficos de la Cordillera (Figura 2). El flanco oeste de la Cordillera Oriental presenta, de manera general, un régimen compresivo en el que se forma una estructura en flor positiva (Taboada *et al.*, 2000) y un sistema de fallas con vergencia al Oeste, hacia el Valle Medio del Magdalena (VMM). El modelo estructural tectónico de origen y evolución se ha definido como una orogenia desarrollada dentro de una cuenca intracontinental (Graterol, 2009) y que posteriormente se exhumó, dándose la fase principal de levantamiento después del Mioceno medio, a partir de la reactivación e inversión tectónica de fallas normales de antiguas cuencas extensionales del Jurásico superior y Cretácico inferior. Estas fallas habían propiciado el ambiente de depositación de las formaciones que posteriormente fueron afectadas por el levantamiento (Lozano y Zamona 2014).

Figura 2

Mapa tectónico regional actualizado del área de estudio



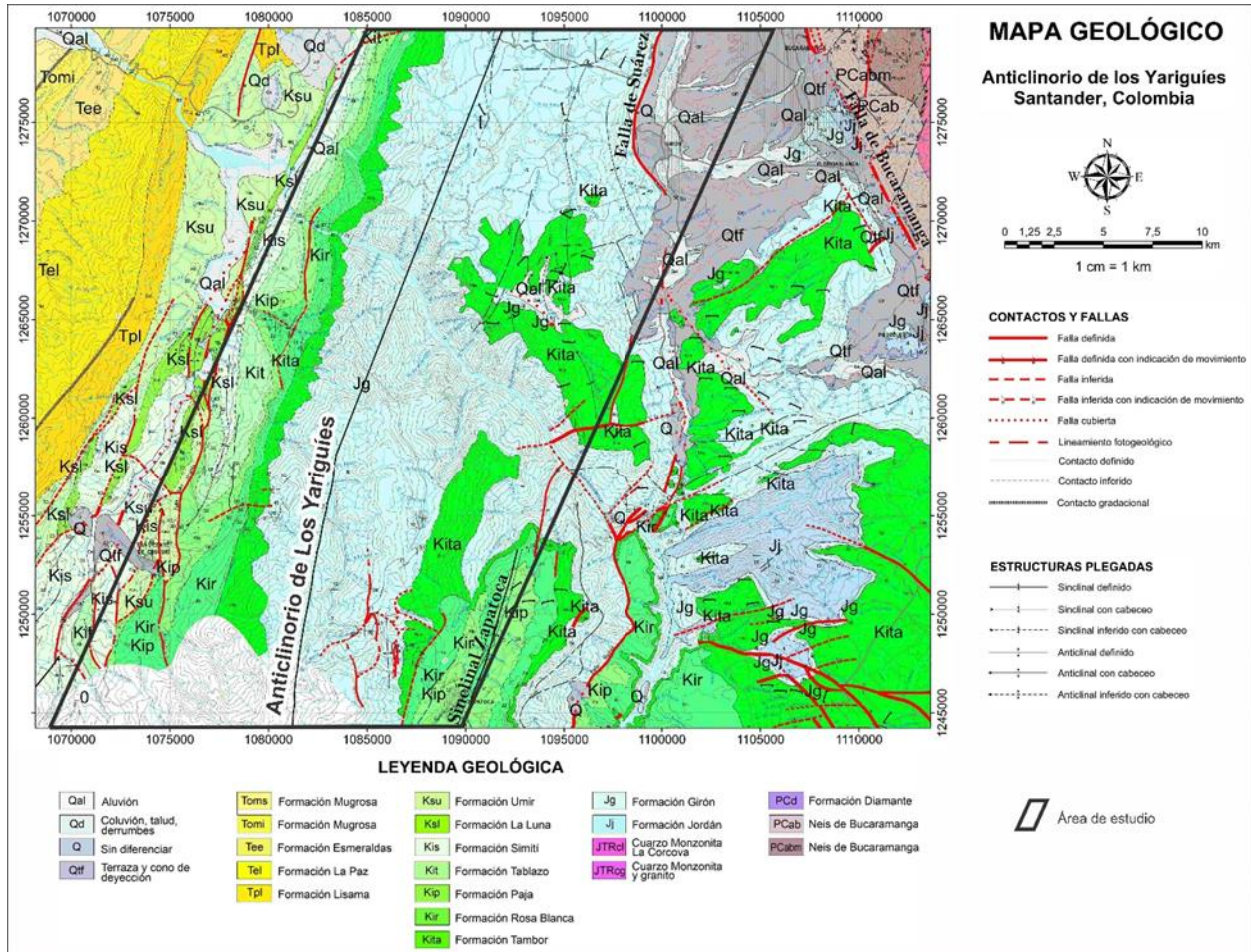
Nota. Mapa tectónico regional actual del área de estudio con las principales estructuras cercanas al área de estudio como la Falla de Bucaramanga y vectores de desplazamiento con dirección NEE.

En el Jurásico se presentan procesos extensionales que dan origen a una cuenca intraarco, donde comenzaron a depositar las formaciones que posteriormente fueron afectadas por el levantamiento de la Cordillera Oriental. En el Mesozoico Temprano, se generaron varias subcuencas, las cuales se encuentran limitadas por fallas normales, este dominio extensional dio el inicio de una cuenca intraarco (Lozano y Zamona, 2014).

En la etapa de deformación por inversión tectónica del Oligoceno se presentó rotación en sentido horario (Jiménez *et al.*, 2022) y otros autores han indicado rotaciones como Bayona *et al.*, (2006) en el área de Mesas, que reportó rotaciones de 90° aproximadamente para la Formación Jordán (Figura 3) (Jiménez *et al.*, 2022). En el anticlinorio de los Yariguíes se han reportado rotaciones de 48° para las Formaciones del Jurásico y Cretácico Inferior, provocadas por el desplazamiento de fallas transversales, regionales y locales, entre las que se encuentran la Falla de Bucaramanga, la Falla de Suratá y la Falla El Monje (Jiménez *et al.*, 2021). La Falla de Bucaramanga con desplazamiento sinistral, a nivel regional, generó la reactivación de fallas normales, como la Falla del Monje y la Falla de Suratá (Jiménez *et al.*, 2022).

Figura 3

Mapa geológico de la zona de estudio en el Anticlinorio de los Yarigués



Nota. Mapa geológico de la zona de estudio en el Flanco Oriental del Anticlinorio de los Yarigués, Santander, Colombia. En el área la Falla del Suárez limita al Anticlinorio al Este. Cartografía base tomada de Base de datos vectorial básica. Colombia. Escala 1:100.000 del IGAC. Geología tomada de la Plancha 120 Bucaramanga a escala 1:100.000 INGEOMINAS.

4. Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados en el trabajo de investigación se llevaron a cabo cuatro principales fases.

4.1. Fase 1: Identificación de litologías y fallas en el área de estudio, y determinación de las cinemáticas por medio de indicadores cinemáticos como las estrías de fallas

Actividad 1.1: Realización de una revisión bibliográfica, donde se incluyen diferentes tipos de textos como capítulos de libros, informes, publicaciones de revistas y artículos científicos principalmente.

Actividad 1.2: Reconocimiento de manera remota el área de estudio, por medio de herramientas como Google Earth y mapas para la determinación de las rutas y/o vías de acceso necesarias para definir el trazo de las secciones transversales.

Actividad 1.3: Ejecución del trabajo de campo. Realización del recorrido de las secciones transversales. La primera comprende el camino de Lengerke, este recorrido va desde la falla del Suárez hasta el municipio de San Vicente de Chucurí pasando por Zapatoca. La segunda ruta es la de Girón-Lebrija donde se cuenta con diferentes vías de acceso y afloramientos también presentes en la zona desde Girón hasta el aeropuerto. La última sección transversal corresponde a un recorrido en lancha donde se espera alcanzar nuevos datos que amplíen en análisis estructural, el recorrido abarca el puente el tablazo, puente Zapatoca y San Vicente de Chucurí.

Actividad 1.4: Descripción de las litologías observadas en campo, recolectar los datos estratigráficos como el rumbo y buzamiento. Identificar las estructuras principales y las de segundo orden, medir los planos axiales de los pliegues, planos de fallas, clivajes, diaclasas y hacer una

primera interpretación de las cinemáticas de las fallas por medio del análisis de los indicadores cinemáticos recolectados como las estrías de fallas.

Actividad 1.5: Establecimiento de las unidades geológicas que se encontraron en el área de estudio, por medio de las observaciones que se realizaron en campo y la comparación de las descripciones de la bibliografía, para identificar las Formaciones que afloran en el flanco frontal del Anticlinorio de los Yariguíes.

4.2. Fase 2: Determinación de la vergencia de las estructuras, estilo estructural y modelación de las unidades de roca basados en datos cartográficos y cortes geológicos

Actividad 2.1: Determinación de los tipos de estructuras presentes en el área de estudio. Para la clasificación de los tipos de estructuras y calcular los valores de características, como la superficie axial en los pliegues, se realizarán proyecciones estereográficas de los datos de líneas y planos medidos en campo que permitan establecer las cinemáticas de las estructuras, con la ayuda de softwares como Stereonet y GeoRose.

Actividad 2.2: Definición del campo de esfuerzos y la elipse de deformación de la zona con el tipo de estructuras que se establecieron, su dirección y cinemáticas.

Actividad 2.3: Definición del tipo de modelación según la litología y el régimen de esfuerzos, inclinación y tipos de fallas respectivamente. Esta actividad ayudará en la realización de los cortes de la siguiente fase.

4.3. Fase 3: Elaboración de un mapa síntesis con la revisión cartográfica y cortes geológicos donde se muestren los estilos estructurales de la zona de estudio

Actividad 3.1: Organización de los datos recolectados en campo en tablas de si se tratan de datos estructurales o de estratigrafías y de las estructuras.

Actividad 3.2: Establecimiento de un sistema de coordenadas para el trabajo en el software y cartografía base.

Actividad 3.3: Ingreso de los datos recolectados en campo en el software *ArcGIS*. Se trazan los contactos litológicos, las líneas de charnela de los pliegues y las líneas de falla con ayuda de la geomorfología y la dirección (*trend*) y cabeceo (*plunge*).

Actividad 3.4: Realización de tres cortes geológicos, perpendiculares a las estructuras, con la información determinada en la Fase 1 y 2, la estratigrafía, estructuras y cinemáticas de las estructuras, estilo estructural, modelación y la vergencia de estructuras.

4.4. Elaboración del informe

Por último, se redacta y revisa el libro de trabajo de grado donde se encontrarán las conclusiones a las que se llegaron con la ejecución del proyecto de investigación y el alcance de los objetivos que se establecieron al inicio de la investigación. Además, se realizará un borrador de la investigación para presentar en un artículo indexado/homologado.

5. Resultados

5.1. Identificación de litologías y fallas en el área de estudio, y determinación de las cinemáticas por medio de indicadores cinemáticos como las estrías de fallas

5.1.2. Reconocimiento mediante sensores remotos del área de estudio para determinar las rutas y/o vías de acceso necesarias en la definición del trazo de las secciones transversales.

El reconocimiento de manera remota del área de estudio se realizó con el fin de establecer las secciones transversales a la estructura del Anticlinorio de los Yarigués. Como punto de partida,

se realizó un mapa de sombras para identificar los lineamientos y posibles cambios en las tendencias que presentaban.

En la zona cercana al municipio de Lebrija se observó una tendencia NE-SW en los lineamientos y otros en una dirección casi EW, además, con ayuda de imágenes satelitales se determinaron rumbos de las capas NW-SE con buzamiento hacia el SW. Por estas observaciones, se determinó la sección I en la vía que comunica los municipios de Girón y Lebrija (Anexo A: Figura A1).

Se realizó un recorrido preliminar por Google Earth para encontrar potenciales afloramientos, que luego se tomarían como estaciones, y facilitar así el trabajo en campo. Otra vía cercana al área es la que conecta a Girón con el aeropuerto, esta vía, aunque se encuentra paralela al eje del Anticlinorio de los Yarigués y a la Falla del Suárez se toma como un recorrido de control (C) que puede servir para los datos con la sección I.

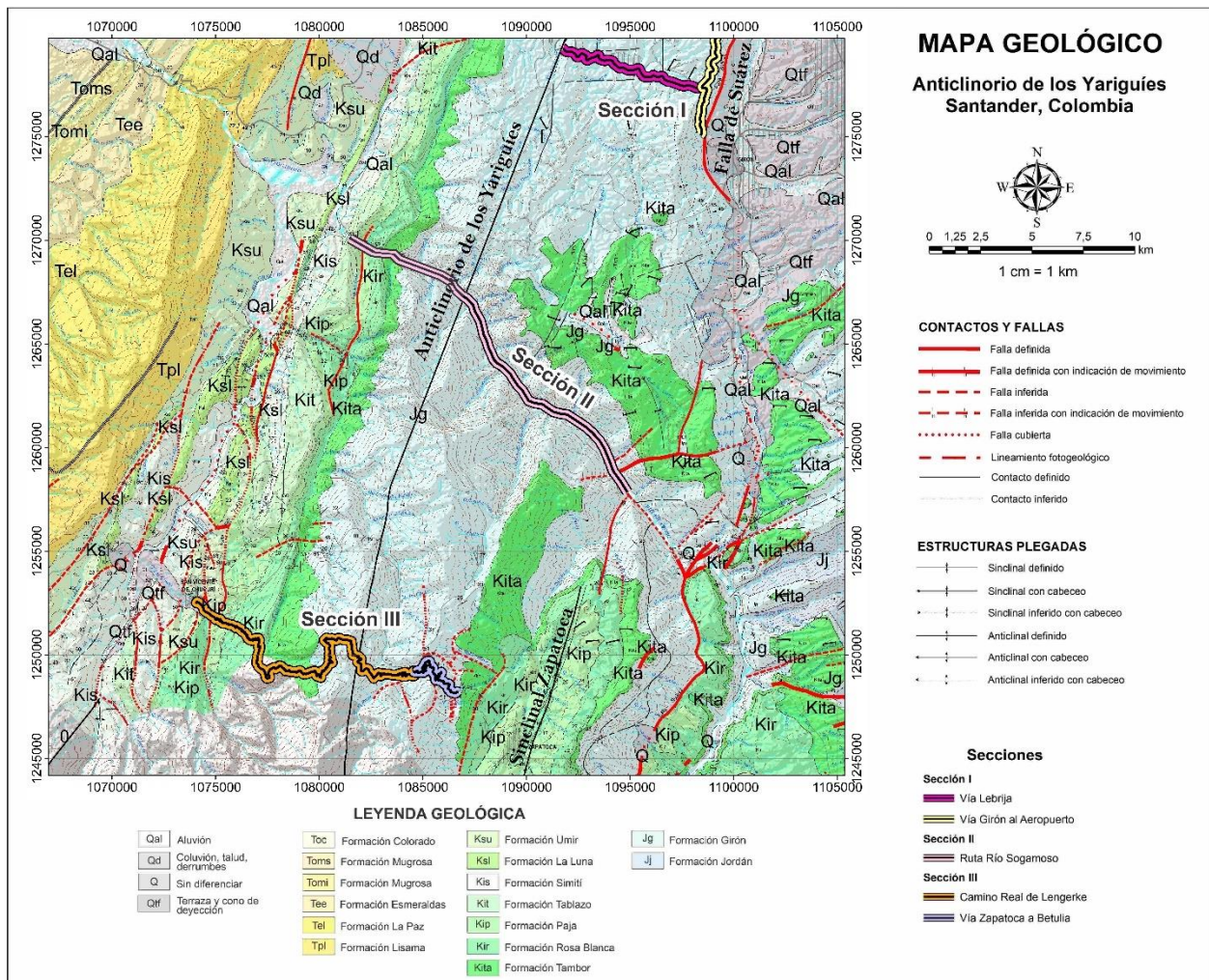
Por otra parte, se eligió la sección II correspondiente a la ruta del Río Sogamoso (Anexo A: Figura A2), la cual permite acceso a datos en afloramientos que han tenido poco estudio por su accesibilidad y que podrían aportar significativamente a este proyecto.

La sección III (Anexo A: Figura A3) corresponde al denominado *Camino Real de Lengerke*, el cual conecta a los municipios de Zapatoca y San Vicente de Chucurí, así como parte de la vía que de Zapatoca conduce a Betulia; esta ruta se eligió por motivos de accesibilidad, la densidad de afloramientos de interés, al igual que cumple con el requisito de encontrarse transversal a la estructura del Anticlinorio de los Yarigués y es un tramo más extenso que permite un análisis regional de la zona de estudio.

A partir del reconocimiento general del área de estudio, se generaron las tres secciones transversales mostradas en la Figura 4, lo que permitió el desarrollo de la actividad correspondiente al trabajo de campo.

Figura 4

Mapa geológico del área de estudio



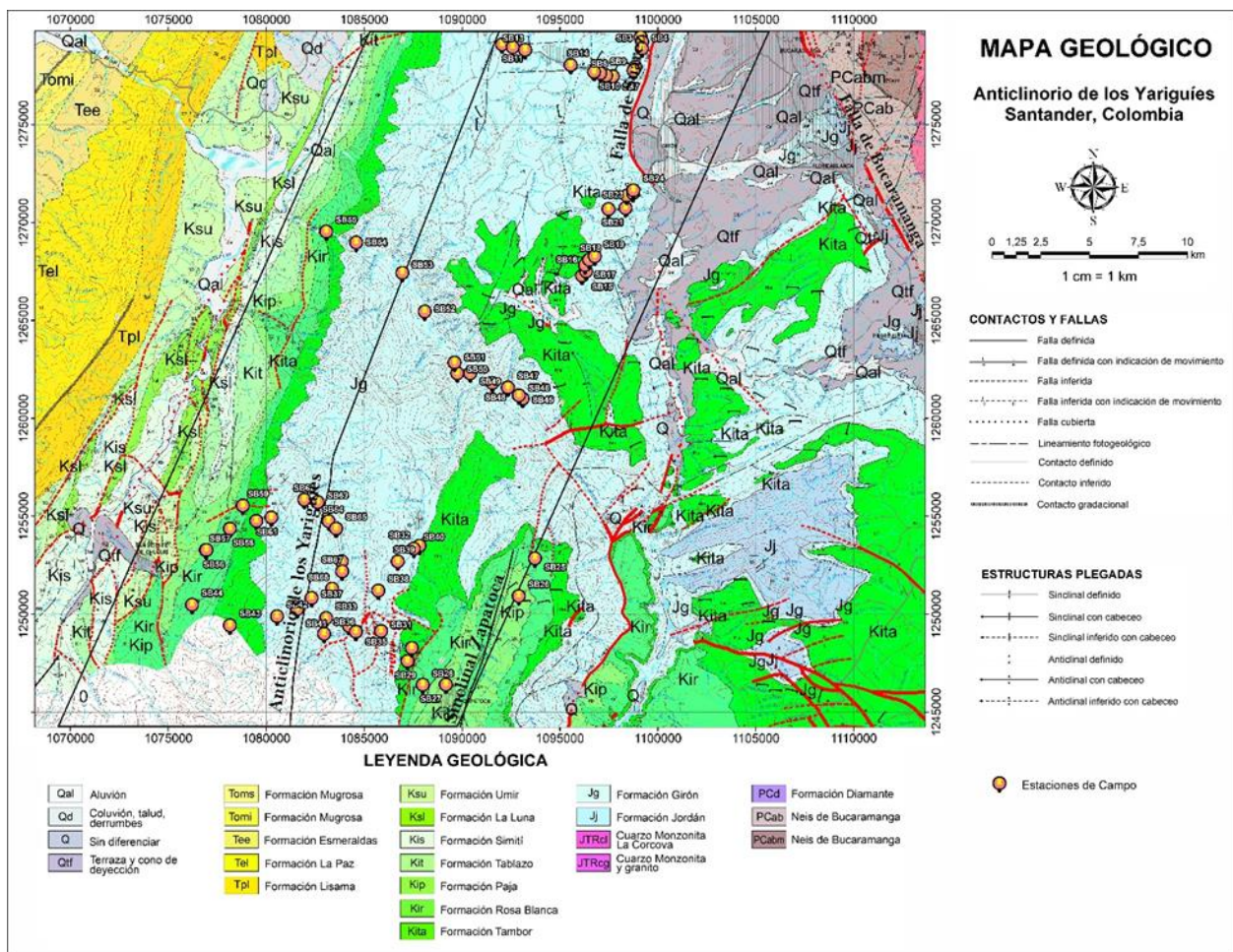
Nota. Mapa de las secciones de la zona de estudio en el Flanco Oriental del Anticlinorio de los Yarigués, Santander, Colombia. Geología tomada de Gómez *et al.*, (2015).

5.1.3. Ejecución del trabajo de campo

En el transcurso del trabajo de campo se realizaron un total de 68 estaciones (Figura 5) durante 8 días y se recolectaron 385 datos estructurales, dentro de los cuales se cuentan con la estratificación, diaclasas, estrías, planos de falla, clivajes y venas.

Figura 5

Mapa de las estaciones de campo en el área de estudio



Nota. Mapa de las estaciones de campo en la zona de estudio en el Flanco Oriental del Anticlinorio de los Yarigués, Santander, Colombia. Geología tomada de Gómez *et al.*, (2015).

5.1.4. Descripción de litologías, recolección de datos estratigráficos, identificación de las estructuras principales y de segundo orden, medición de los planos axiales de los pliegues, planos de fallas, clivajes, diaclasas, e interpretación inicial de la cinemática de las fallas

El trabajo en campo inició con la descripción del afloramiento, luego la geología, en la cual se describió la geometría de las capas y el color. Después, se tomaron los datos estructurales con la identificación de la estratificación y de las familias de diaclasas (Anexo E).

En los afloramientos en los que se observó discontinuidad de las capas, o cambios en las orientaciones, se realizó un análisis preliminar en el cual se establecieron las estructuras principales y las de segundo orden que tenían incidencia en los afloramientos y en la zona, así mismo se tomaron los datos de planos axiales de los pliegues, planos de fallas y clivajes (Anexo B).

5.1.5. Establecimiento de unidades geológicas y comparación con las descripciones de la bibliografía, para identificar las Formaciones que afloran en el flanco frontal del Anticlinorio de los Yarigués.

En el flanco Frontal del Anticlinorio de los Yarigués aflora una secuencia de rocas de ambiente continental, fluvial y aluvial, que corresponden en su mayoría al Grupo Girón, de edad Jurásico Tardío a Cretácico Temprano (157-139 Ma) (Jiménez *et al.*, 2021).

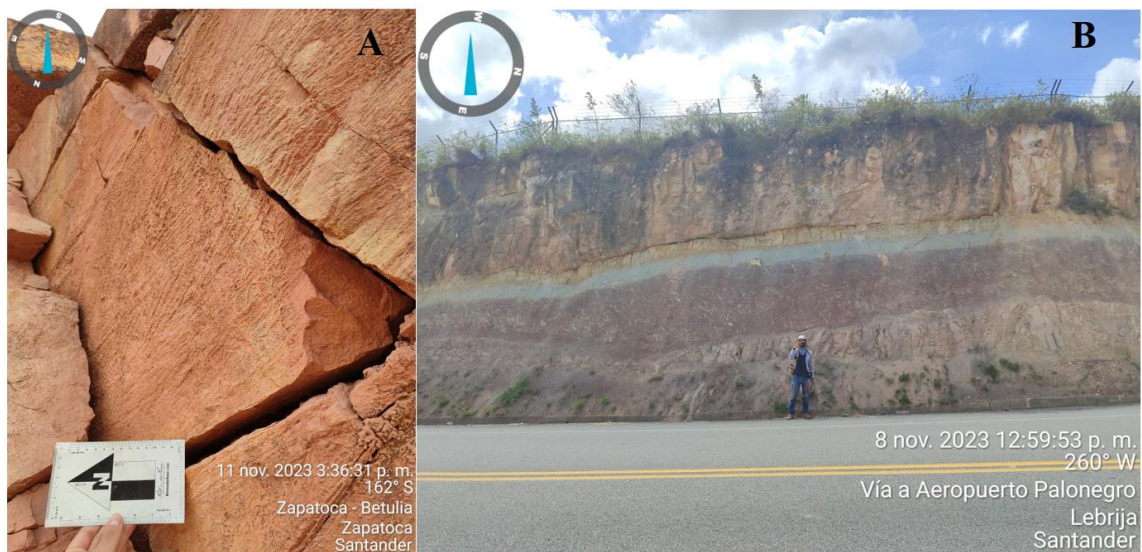
El Grupo Girón conforma en su mayoría al Anticlinorio de los Yarigués, encontrando hacia el núcleo de esta estructura la base del Grupo Girón, que corresponde a la Formación Girón o Formación Río Lebrija (Osorio y Velandia, 2021). El Grupo Girón fue propuesto por Etayo-Serna (1989) y lo conforman la Formación Angostura del Río Lebrija, de edad entre el Kimmeridgiano Temprano y el Tithoniano temprano (157-146,5 Ma), y la Formación Los Santos de edad Berriasiana, entre el Tithoniano y Valanginiano (146,5-139,3 Ma) (Jiménez *et al.*, 2021).

Hacia el Norte del área de estudio, en el Anticlinorio de los Yariguíes, la Formación Angostura del Río Lebrija se caracteriza por ser una roca sedimentaria siliciclástica débilmente meteorizada, dispuesta en capas gruesas a muy gruesas, con contactos netos variando a ondulosos y con tonalidades oscuras superficialmente, mientras que, en roca fresca, se observan colores crema, blanco y gris claro. Además, las capas presentan estratificación plano-paralela con algunas laminaciones cruzadas (Figura 6A).

La Formación Angostura del Río Lebrija presenta variaciones litológicas que van desde rocas competentes, con variaciones en tamaños de grano, como conglomerados y areniscas, y niveles menos competentes de lodolitas y arcillolitas (Figura 6B).

Figura 6

Afloramientos (Grupo Girón)



Nota. A. Laminación cruzada en el Grupo Girón. B. Capas del Grupo Girón con variaciones litológicas, los niveles más competentes corresponden a areniscas y conglomerados, los menos competentes a lodolitas.

La Formación Los Santos fue definida por Hedberg (1931) como Formación Tambor, pero fue Cediell (1968) quien propone el nombre de Formación Los Santos, la cual consiste en conglomerados y areniscas conglomeráticas (Alarcón *et al.*, 2019). En el área de estudio, la Formación Los Santos se encontró en capas medias a gruesas competentes, masivas y tabulares, en su mayoría presentaba estratificación paralela y en algunos afloramientos laminación cruzada. Adicionalmente, esta formación se encontró con tonalidades blancas en la superficie y en el interior color crema y con intercalaciones en algunas zonas de areniscas con niveles delgados de arcilla rojizas (Anexo E).

En el flanco Frontal del Anticlinorio de los Yariguíes afloran otras rocas, como las de la Formación Jordán, la cual no fue encontrada en las rutas realizadas en el área de estudio. Esta formación es del Jurásico Temprano, cercano al límite Triásico- Jurásico ($201,3 \pm \text{Ma}$) (Cohen *et al.*, 2013; Alarcón *et al.*, 2020) y la Formación Rosa Blanca de un ambiente marino somero del Cretácico Inferior (Etayo y Guzmán, 2019).

En inmediaciones de Zapatoaca se identificaron varios miembros de la Formación Rosa Blanca. Inicialmente, el miembro Zo compuesto de intercalaciones de capas medias y delgadas de calizas y lodolitas moderadamente calcáreas, físilas y laminadas con estratificación paralela, donde fue posible encontrar varios fósiles de bivalvos.

Continuando, se encontró el miembro El Sapo, el cual exhibía capas muy gruesas calcáreas compuestas de wackstone y packstone en paquetes masivos, que se intercalan con niveles de mudstone altamente bioturbados con presencia abundante de Thalassinoides; con respecto a los contactos de este miembro, estos fueron difusos, pero diferenciables por la competencia de las capas de wackstone, además, se encontraron fósiles de *Toxaster* y pequeñas conchas de bivalvos en las capas más competentes. Finalmente, el miembro Lagunetas se identificó en capas medias a

gruesas tabulares de mudstone de color ocre a beige por meteorización y se encontraba muy fracturado.

Por último, se establece la Formación Paja en inmediaciones de la transecta de Zapatoaca a San Vicente de Chucurí, cercano a este último. La Formación Paja se encontró en capas gruesas de calizas y shales, los niveles más competentes corresponden a mudstone que tiene rastros de esparita. En el caso de los contactos de la formación, van de netos a ondulados por calgos de carga y las capas de shale terrígeno cuentan con niveles nodulares de colores grises y oscuros con presencia de materia orgánica. Adicionalmente, se encontraron fósiles de bivalvos de hasta seis centímetros (Anexo F: Figura F3).

5.2. Determinación del campo de esfuerzos y definición de la elipse de deformación de la zona y el modelo de evolución de las unidades de roca y fallas basados en datos cartográficos y cortes geológicos

5.2.1. Determinación de los tipos de estructuras presentes en el área de estudio

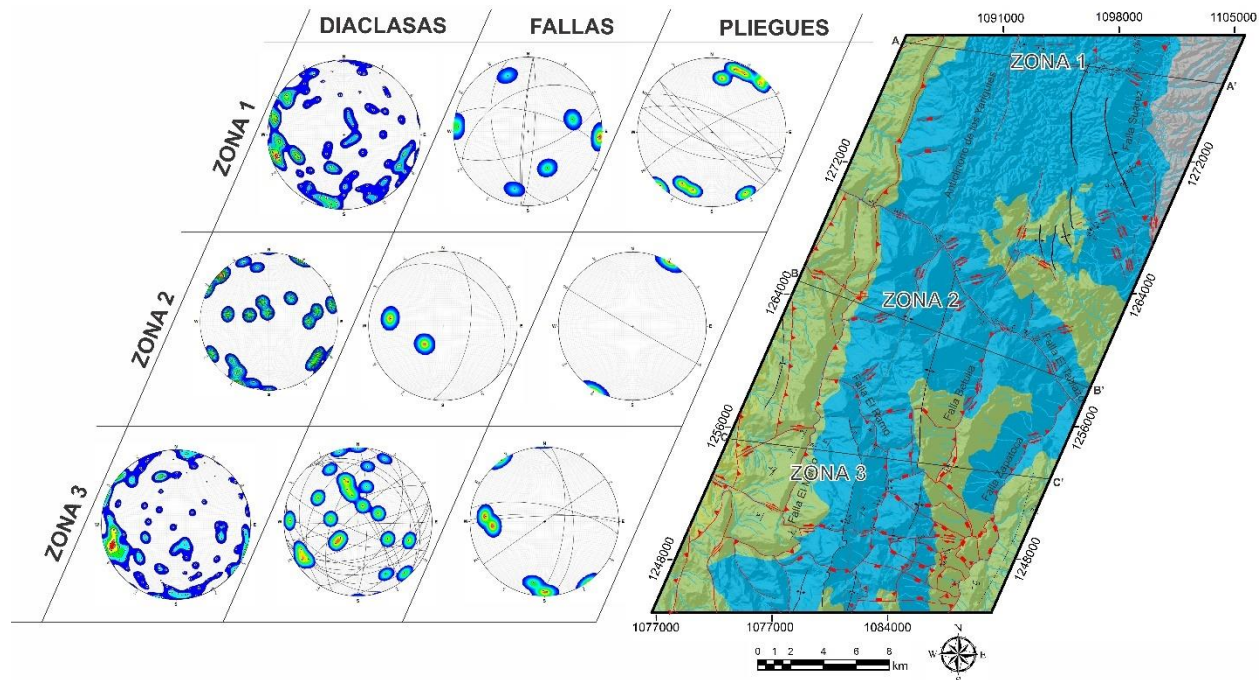
Para el análisis de las estructuras presentes en el área, se establecieron tres zonas específicas de deformación (Anexo B) facilitando la evaluación individualizada de las características estructurales en cada área. La primera zona corresponde a las estaciones SB1 a la BS-24 en la primera transecta, la segunda zona pertenece a la zona del Río Sogamoso que comprende las estaciones SB-45 a la SB-55 y la última corresponde a la zona de mayor deformación del área de estudio, se trata de la zona al Sur y que corresponde a la transecta principal del camino entre Zapatoaca- San Vicente de Chucurí que comprende las estaciones de la SB-25 a la SB-44 y de la SB-56 a la estación SB-68. En las tres zonas se encontraron datos estructurales de fallas, pliegues y diaclasas.

5.2.1.1. Fallas. En el estudio geológico de la transecta Girón-Lebrija-Aeropuerto correspondiente a la zona 1, se identificaron fallas de rumbo dextrales con componentes normales y algunas fallas netas de rumbo. Los valores de *pitch* de las fallas en esta zona son predominantemente bajos, con un promedio de 10 grados (Figura 7 y Figura 8).

En la zona 2 del embalse, se encontró una falla dextral con un rake de 26° , estrías intraformacionales, fallas inversas de flexura con 50° de *pitch* al SW. En esta zona se evidencia la deformación compresiva que se presentó en la región y la falla inversa de flexura de 045/28 con *pitch* de 30° SE y *rake* de 150° se encuentra relacionada con la estructura principal del lugar, que es el Anticlinorio de los Yarigües (Figura 7).

Figura 7

Mapa de las zonas con las proyecciones estereográficas de diaclasas, fallas y pliegues

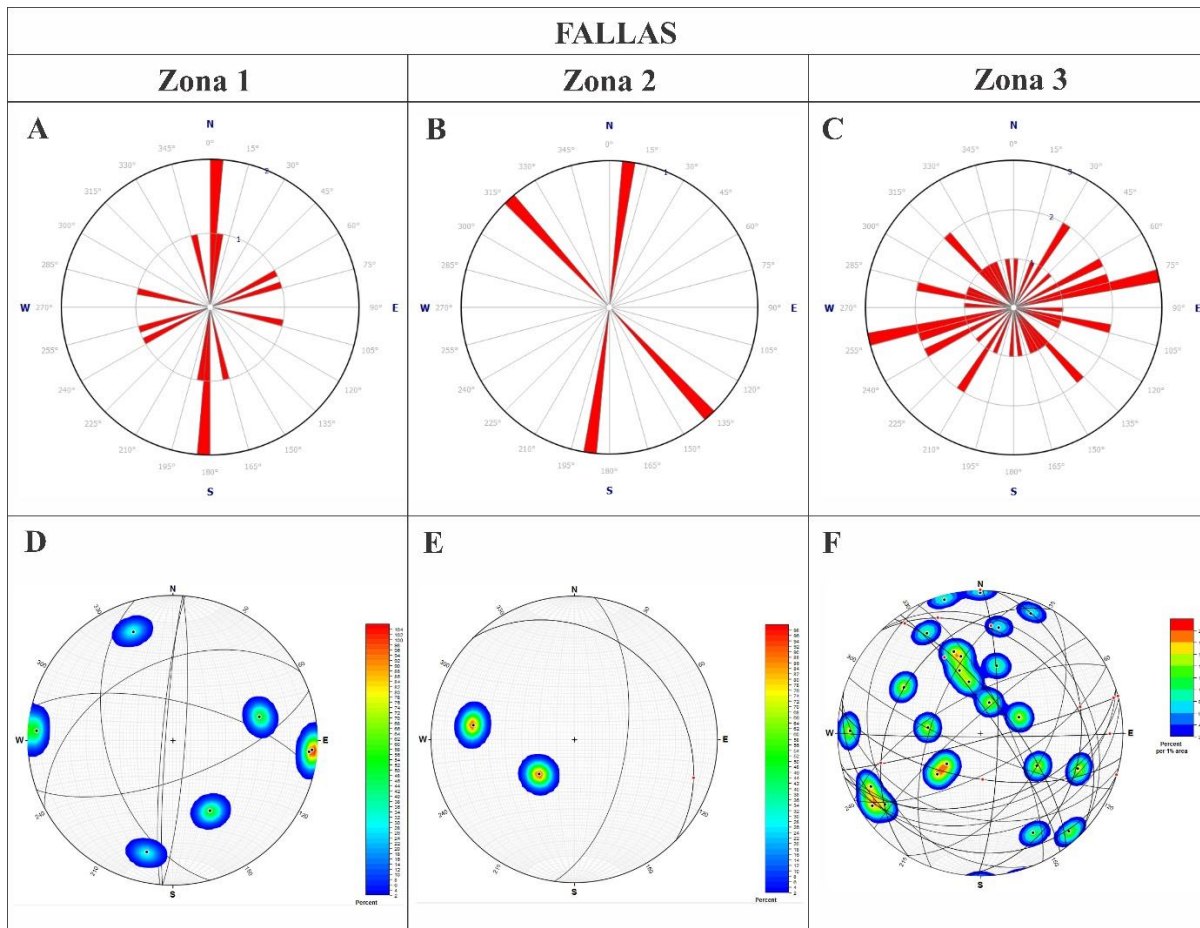


Nota. Planos y diagramas de polos para cada una de las zonas del área de estudio.

En la zona 3, correspondiente a la transecta de Zapatoaca a San Vicente de Chucurí, se encontraron fallas normales, una de ellas con un rake de 84° y una tendencia E-W, otra falla normal de tendencia NNE-SSW, que presentaba un dominó de manera local (Figura 7). También, se encontraron estrías intraformacionales en calizas de la Formación Rosablanca, con un plano de falla de tendencia SW-NE, una falla inversa dextral intraformacional en el Grupo Girón con 72° de Rake y Pitch NW, y fallas netas de rumbo, lo que indica su pitch de 0° . Así mismo, la falla inversa dextral intraformacional encontrada en el Grupo Girón podría tratarse de una evidencia de un evento presentado en la zona de estudio como lo es la reactivación tectónica.

Figura 8

Análisis de tendencias de fallas de la zona de estudio.

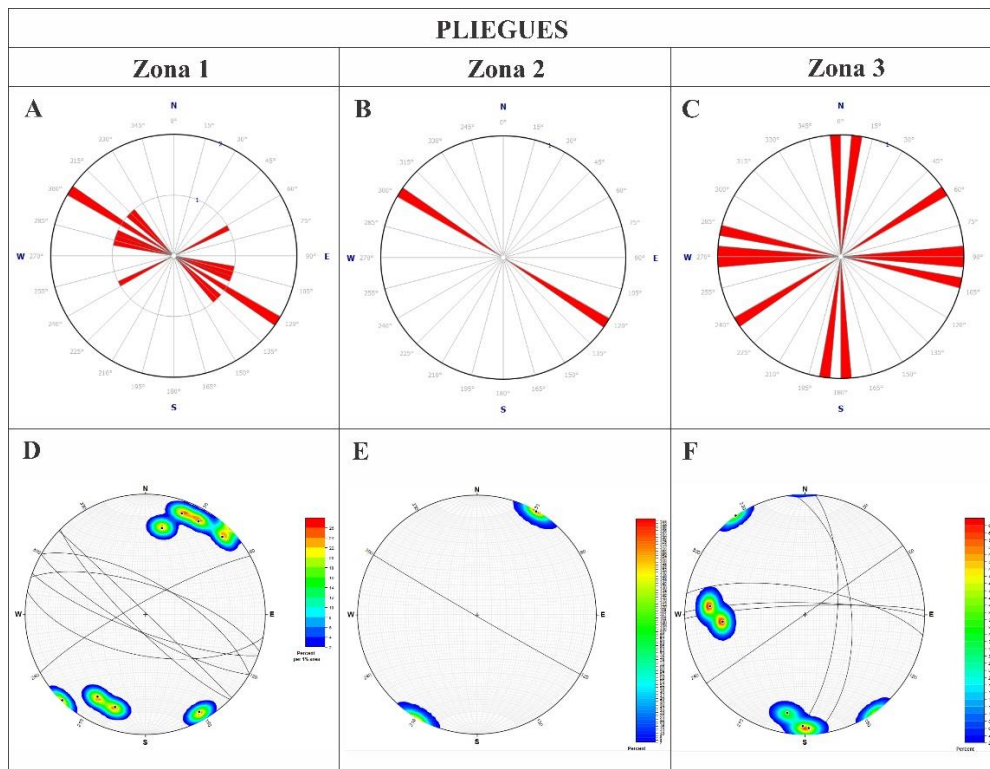


Nota. Diagramas de rosas y diagramas de polos de los planos de fallas para cada uno de los sectores de la zona de estudio. *A.* Azimut de Rumbo de la zona 1. *B.* Azimut de Rumbo de la zona 2. *C.* Azimut de Rumbo de la zona 3. *D.* Planos y densidad de polos de la zona 1. *E.* Planos y densidad de polos de la zona 2. *F.* Planos y densidad de polos de la zona 3.

5.2.1.2. Pliegues. La zona de estudio también ha sido afectada por diferentes eventos tectónicos que han deformado las rocas de forma dúctil. En el estudio se encontraron clivajes, algunos en capas incompetentes y otros con tendencia casi E-W (Figura 9). En la estación SB-40 en inmediaciones del municipio de Betulia en la zona 3, se encontró un pliegue parásito o pliegue de segundo orden correspondiente a una S. Hacia el W de la zona 2, en la estación SB-55 se encontró un pliegue de segundo orden correspondiente a una Z.

Figura 9

Análisis de tendencias de pliegues de la zona de estudio.

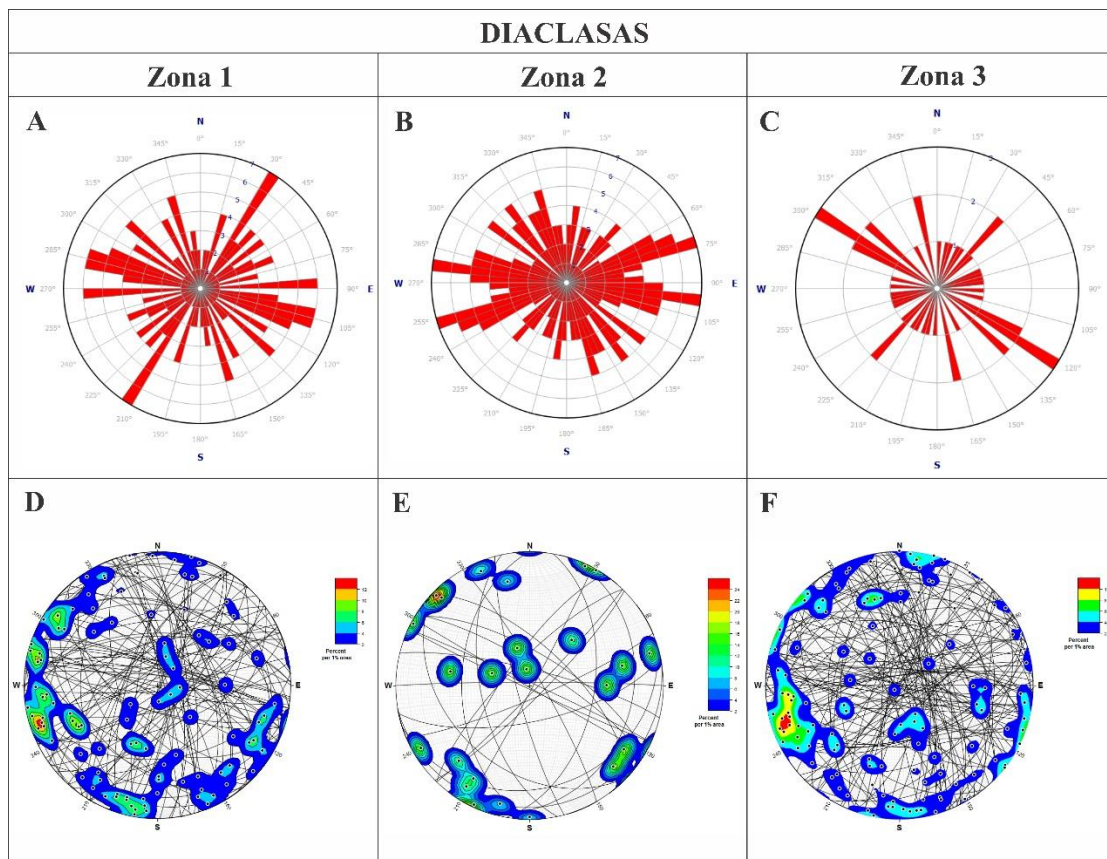


Nota. Diagramas de rosas y diagramas de polos de los planos axiales o clivajes de pliegues para cada uno de los sectores de la zona de estudio. *A.* Azimut de Rumbo de la zona 1. *B.* Azimut de Rumbo de la zona 2. *C.* Azimut de Rumbo de la zona 3. *D.* Planos y densidad de polos de la zona 1. *E.* Planos y densidad de polos de la zona 2. *F.* Planos y densidad de polos de la zona 3.

5.2.1.3. Diaclasas. En la Figura 10 se presenta la densidad de polos de las familias de diaclasas en las zonas 1, 2 y 3. Se observa una familia principal de diaclasas con una orientación aproximada de 340°/82° en la zona 1 y zona 3. Esta concentración de diaclasas muestra una continuidad a lo largo de la estructura del Anticlinorio de los Yarigües de N a S en el área de estudio.

Figura 10

Análisis de tendencias de diaclasas de la zona de estudio.



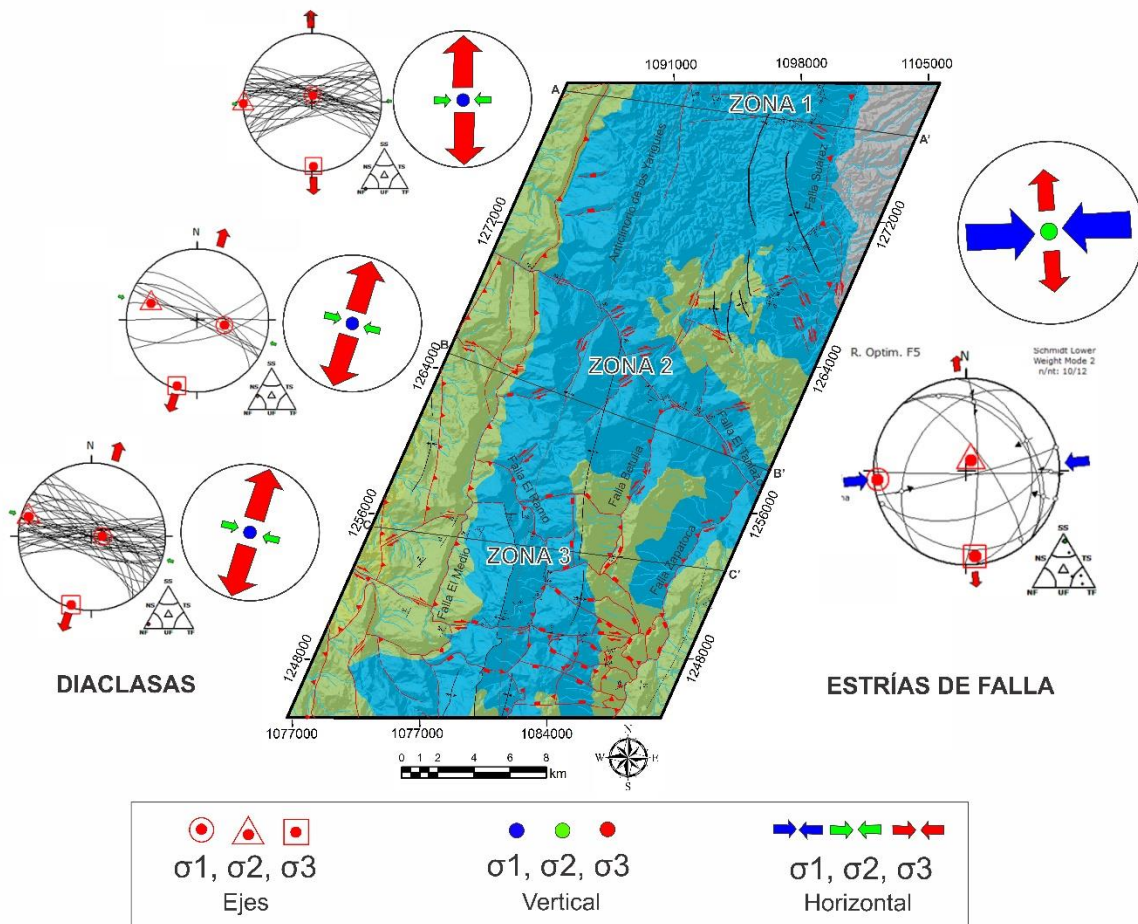
Nota. Diagramas de rosas y de polos de diaclasas para los sectores de la zona de estudio.
A. Azimut de Rumbo de la zona 1. B. Azimut de Rumbo de la zona 2. C. Azimut de Rumbo de la zona 3. D. Planos y densidad de polos de la zona 1. E. Planos y densidad de polos de la zona 2. F. Planos y densidad de polos de la zona 3.

5.2.2. Definición del campo de esfuerzos y la elipse de deformación de la zona de estudio.

En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos para la cada la zona 1,2 y 3 de los tensores de esfuerzos de diaclasas y el tensor de esfuerzos del área de estudio obtenido por medio de las estrías de fallas por el método de Diedros Rectos y al final con R. Óptimo.

Figura 11

Mapa de los tensores de diaclasas y estrías de falla de las zonas del área de estudio

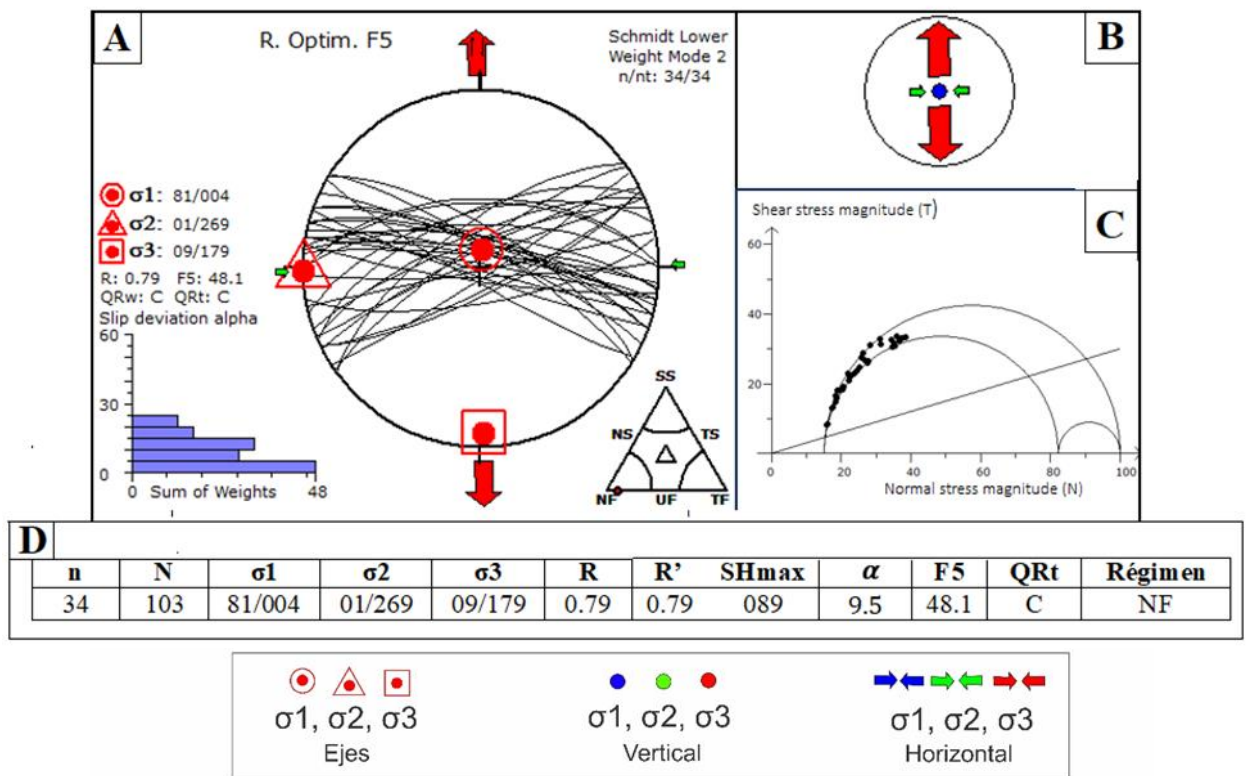


Nota. Mapa geológico del área de estudio con los tensores de esfuerzos de diaclasas y planos de cada una de las zonas y tensor de esfuerzo general del área de estudio por medio de estrías de fallas.

5.2.2.1. Procesamiento de diaclasas. Se procesan los datos de diaclasas por zona considerándolos de “tensión (T)”. En la zona 1 (N = 103) la familia principal del diaclasamiento está entre 100° y 110°, con familias secundarias principales a 30°- 40° y a 165° aproximadamente, además de familias menores entre 60° y aprox. 140° que podrían formar un ángulo de cizalla.

Figura 12

Tensores de esfuerzos de las diaclasas zona 1



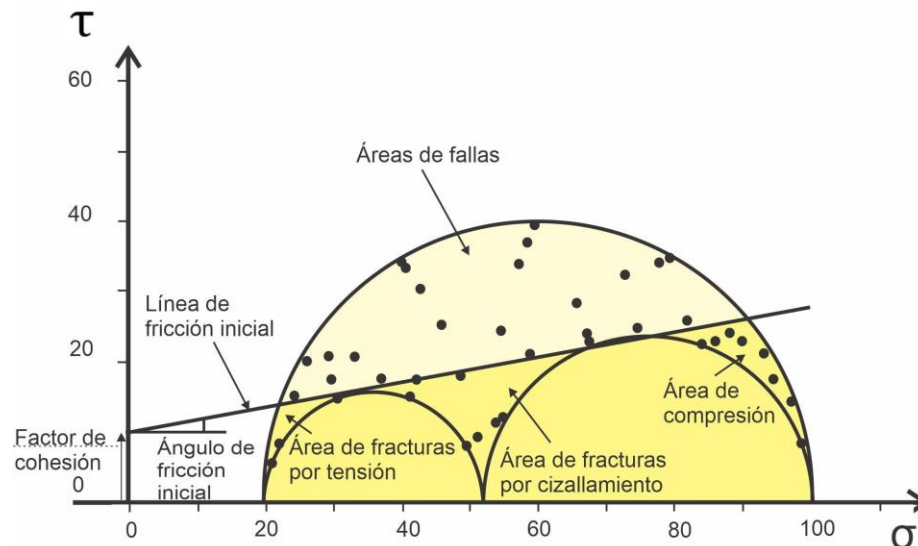
Nota. Tensores de esfuerzos de diaclasas de la zona 1. A. Diagrama de Angelier, R Óptimo F5. B. Gráfico de esfuerzos. C. Círculo de Mohr. D. Información obtenida del procesamiento por el método R. Óptimo de datos de diaclasas de la zona 1.

Si siguiendo la información de la Figura 13 y el círculo de Mohr obtenido por medio del procesamiento de los tensores de esfuerzos se determina que los datos de diaclasas que se

obtuvieron en la zona 1, datos recolectados por la sección de la vía Girón- Lebrija y Girón- Aeropuerto, corresponden en su totalidad a fracturas reactivadas.

Figura 13

Círculo de Mohr



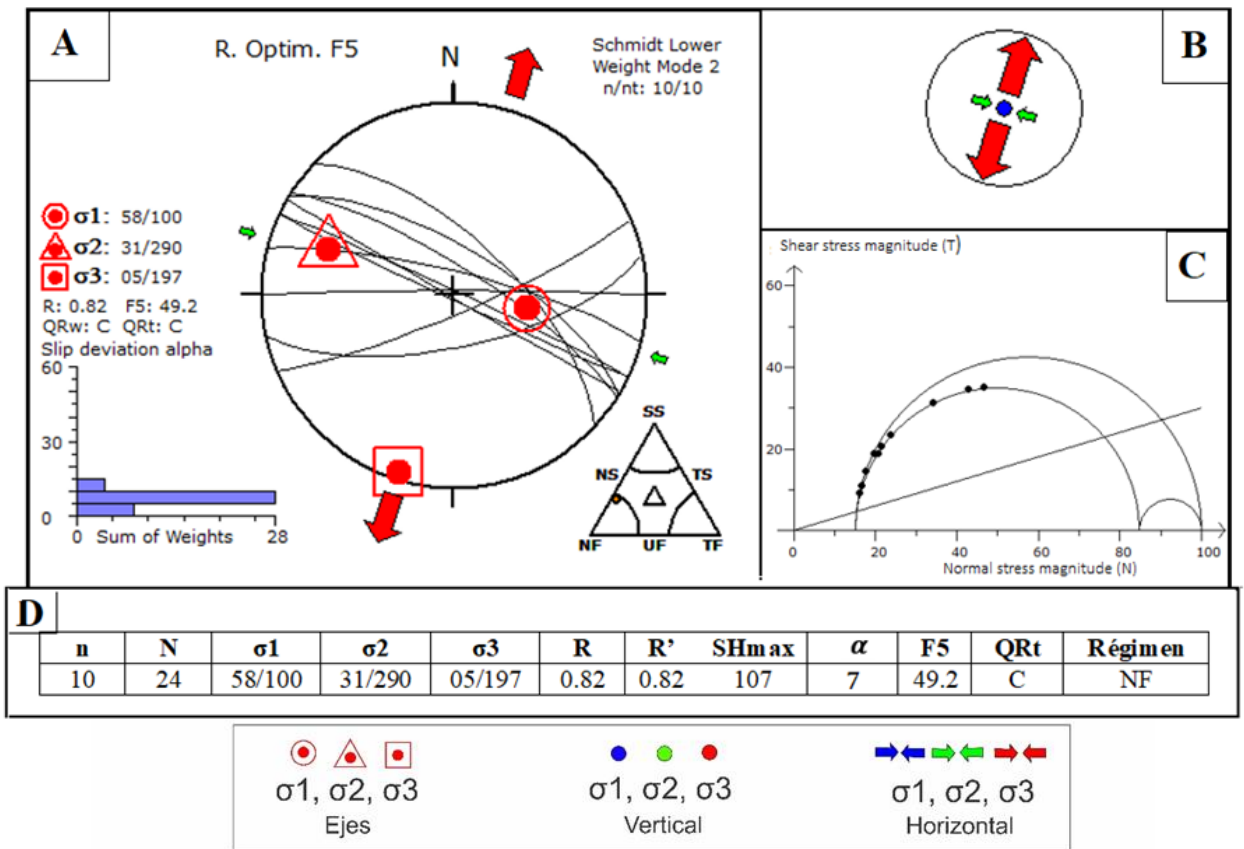
Nota. Círculo de Mohr con las áreas correspondientes a las fallas reactivadas, áreas de fracturas para el análisis de los círculos de Mohr obtenidos en las figuras 12, 14, 15 y 16, inciso C, Shear stress magnitude (T). Imagen tomada de Delvaux, D., & Sperner, B. (2003).

Para la zona 2 (N = 24) se obtiene un cambio en el esfuerzo máximo horizontal que pasa de 089 en la zona 1 a 107 en la zona 2.

Siguiendo la información de la Figura 13 y el círculo de Mohr obtenido por medio del procesamiento de los tensores de esfuerzos se determina que los datos de diaclasas que se obtuvieron en la zona 2 corresponden en su totalidad a fracturas reactivadas. En la zona 2 (Figura 14) se observa una pequeña rotación horaria de los tensores de esfuerzos.

Figura 14

Tensores de esfuerzos de las diaclasas zona 2

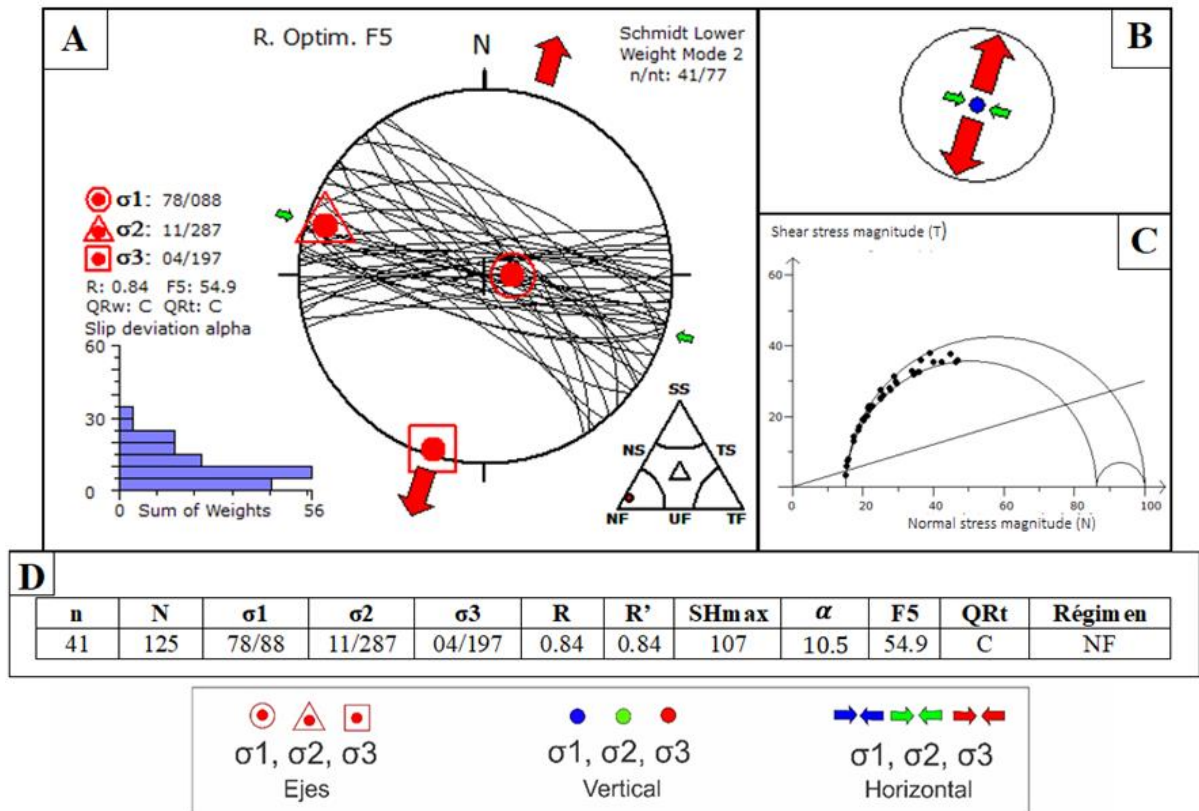


Nota. Tensores de esfuerzos de diaclasas de la zona 2. A. Diagrama de Angelier, R Óptimo F5. B. Gráfico de esfuerzos. C. Círculo de Mohr. D. Información obtenida del procesamiento por el método R. Óptimo de datos de diaclasas de la zona 2.

En la zona 3 (N = 125 datos), las familias de diaclasas principales se encuentran entre 60° y 110° aproximadamente, además de una familia secundaria entre 150° y 170° (Figura 15) similar a la familia de la zona anterior.

Figura 15

Tensores de esfuerzos de las diaclasas de la zona 3



Nota. Tensores de esfuerzos de diaclasas de la zona 3. A. Diagrama de Angelier, R Óptimo F5. B. Gráfico de esfuerzos. C. Círculo de Mohr. D. Información obtenida del procesamiento por el método R. Óptimo de datos de diaclasas de la zona 3.

A partir de la información de la Figura 13 y el círculo de Mohr obtenido por medio del procesamiento de los tensores de esfuerzos se determina que los datos de diaclasas que se obtuvieron en la zona 3 corresponden en su totalidad a fracturas reactivadas. Las diaclasas recolectadas en todas las 3 zonas se encuentran en la misma zona de fracturas que presentan reactivación en el círculo de Mohr. En esta zona 3, al igual que lo que se presenta en la zona 2, se observa una rotación horaria en los tensores de esfuerzos comparado con la zona 1.

5.2.2.2. Tensor de esfuerzos general para estrías de fallas. Se procesan los datos de estrías de fallas para establecer un tensor de esfuerzos general para estrías, este proceso se realiza en el software de *Win-Tensor* y el programa luego de procesar por el método de diedros rectos y consecutivamente por el método de R. Óptimo tomó para el tensor los datos mostrados a continuación (Tabla 1).

Tabla 1

Procesamiento de estrías de falla

Estación	AB	Buz	Pitch	Cinemática	Certeza
SB-25	56	80	42N	S	P
SB-25	162	50	5W	X	P
SB-25	53	72	8S	X	S
SB-25	197	18	0E	X	P
SB-25	165	86	0E	X	P
SB-28	190	64	84E	NS	S
SB-28	180	88	10E	SN	P
SB-53	45	28	30S	I	C
SB-59	91	80	26N	D	C
SB-59	300	38	50S	I	C
SB-63	84	30	72N	ID	C
SB-63	46	34	28N	X	C
SB-63	290	62	0S	S	C

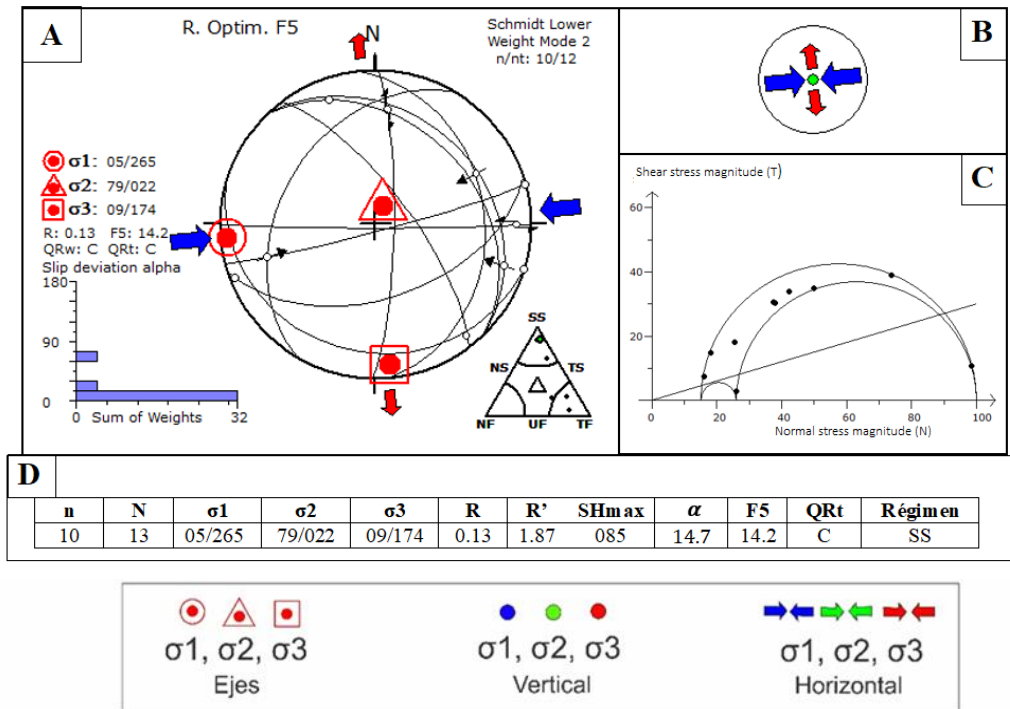
Nota. Datos seleccionados de estrías de fallas de las estaciones. Cinemática: S: Sinistral.

X: No definida. NS: Normal sinistral. SN: Sinistral normal. I: Inversa. D: Dextral. ID: Inversa dextral. Certeza: P: Probable. S: Supuesto. C: Cierto.

Inicialmente, se procesa el conjunto de datos total ($N = 13$) en los que se determinó el pitch/rake de la estría para los planos de falla (Tabla 1). Los datos procesados de estrías de fallas en su mayoría corresponden a fallas reactivadas, sin embargo, se observa en el círculo de Mohr dos fallas que se encuentran en el dominio estable (Figura 16). Adicionalmente, el régimen que se obtiene en el tensor de esfuerzos general para estrías es de rumbo, cizalla simple o transcurrencia.

Figura 16

Tensores de esfuerzos de estrías de falla

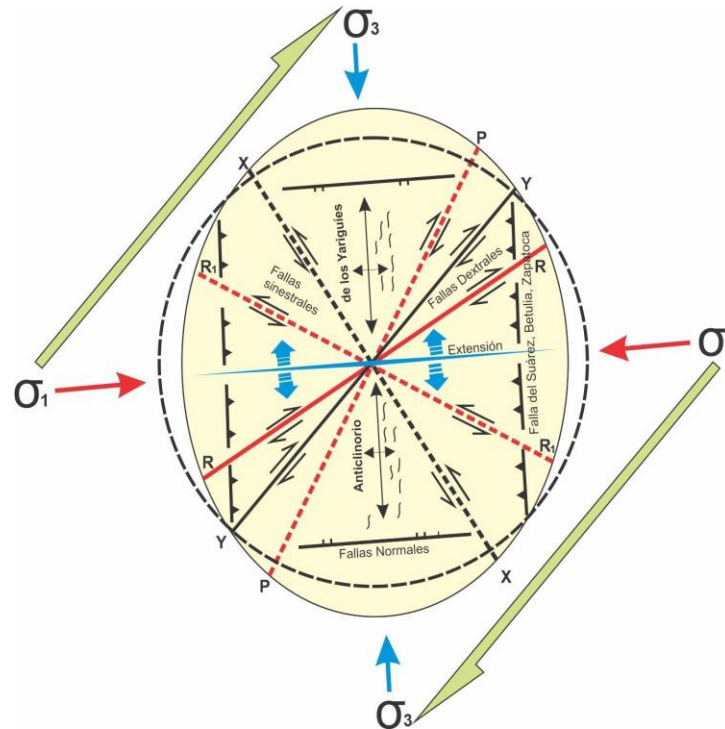


Nota. Tensor de esfuerzos de estrías de falla en el área de estudio. A. Diagrama de Angelier, R Óptimo F5. B. Gráfico de esfuerzos. C. Círculo de Mohr. D. Información obtenida del procesamiento por el método R. Óptimo de datos de estrías de falla del área de estudio.

5.2.2.3. Elipse de deformación

Figura 17

Elipse de deformación de la zona de estudio



Nota. Elipse de deformación del flanco frontal del Anticlinorio de los Yarigües con SHmax 085°.

El campo de esfuerzos obtenido por medio de los datos de estrías y diaclasas permiten establecer la elipse de deformación para la zona de estudio comprendida en el Anticlinorio de los Yarigües (Figura 17). Se usa la elipse de deformación mostrada por Rosello (2009) y se modifica para la zona de estudio con la dirección del sigma máximo horizontal que se establece a 085° a partir de los tensores de esfuerzos que se obtuvieron para las estrías de fallas basados en los datos recolectados en campo del área de estudio, dando así sentido a las estructuras, como las fallas principales en la zona con componente inverso como lo son las Fallas del Suárez, la Falla de

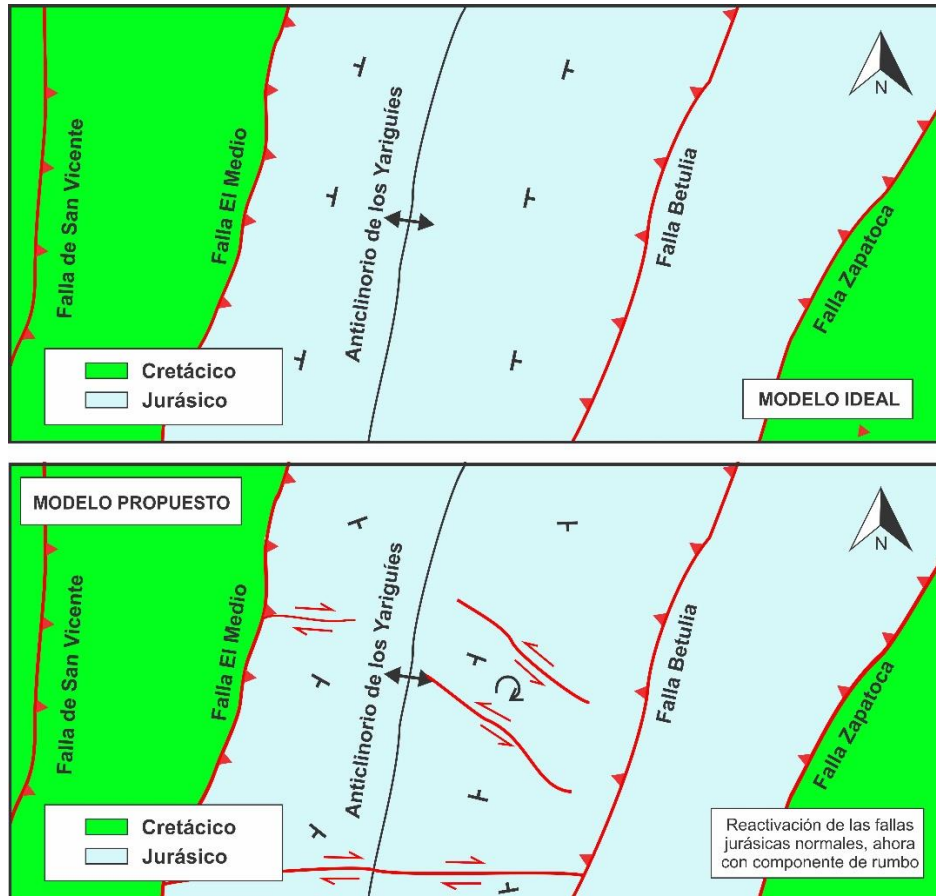
Betulia y la Falla de Zapatoca. De igual manera, la elipse permite establecer un componente de rumbo para las fallas que se encuentran oblicuas al sigma principal, dando así estructuras sinestrales y dextrales principalmente que fueron encontradas en las estaciones en campo. La elipse de deformación es teórica por lo que algunas fallas no cumplen con la cinemática esperada según su orientación, esto se da principalmente en pocas fallas al Sur del área de estudio ya que la zona presenta mayor deformación.

5.2.3. Definir el tipo de modelación según la litología y el régimen de esfuerzos, inclinación y tipos de fallas respectivamente. Esta actividad ayudará en la realización de los cortes de la siguiente fase.

Principalmente, en la zona de estudio se esperaría un modelo ideal, donde los datos estructurales se encuentren similares al rumbo de la estructura principal regional, el Anticlinorio de los Yarigués. Sin embargo, el modelo de evolución indica que en el Jurásico se tiene en el área procesos de extensión (Figura 18), determinada por fallas normales y procesos de depositación del Grupo Girón. Luego, se da un proceso de reactivación de las fallas jurásicas normales con un componente principalmente dextral. Estas fallas normales reactivadas transversales actúan como límites de bloques en los que las unidades principalmente del Jurásico comienzan a presentar rotación, cambiando así los datos estructurales de las unidades de roca, como se evidenció con los datos recolectados en campo. La mayoría de las fallas transversales y oblicuas con componente de rumbo tienen una orientación NE, principalmente se pueden observar en la sección del Río Sogamoso (Figura 19) que es una tendencia que se observa a manera regional, como en los estudios realizados en el Macizo de Santander por Forero-Ortega *et al.*, (2020), donde indican esta misma orientación de fallas transversales con componente de rumbo para la zona.

Figura 18

Esquema fallas



Nota. Modelo de evolución de las fallas en las zonas de estudio durante el Jurásico-Cretácico. A. Modelo ideal de las estructuras en el Anticlinorio de los Yarigües. B. Modelo propuesto con la reactivación de fallas normales del Jurásico que adquieren un componente en rumbo dextral y sinistral que generan rotación en los bloques.

5.3. Elaboración de un mapa síntesis con la revisión cartográfica y cortes geológicos donde se definen los estilos estructurales de la zona de estudio

5.3.1. Organizar los datos recolectados en campo en tablas de si se tratan de datos estructurales o de estratigrafías y de las estructuras.

Para organizar los datos recolectados en campo se utilizó un formato de tablas (Anexo B: Tabla 1B) para los datos estructurales donde se tiene el número del dato, número de la estación, inclinación, azimut de buzamiento, el tipo de dato si se trata de la estratigrafía, diaclasas, estrías, planos de fallas o clivajes y notas donde se ubican los valores del pitch o rake para las fallas, o atributos destacables para el dato tomado en campo.

5.3.2. Establecer un sistema de coordenadas para el trabajo en el software y cartografía base.

Para la elaboración del mapa se estableció el sistema de coordenadas de origen MAGNA-BOGOTÁ.

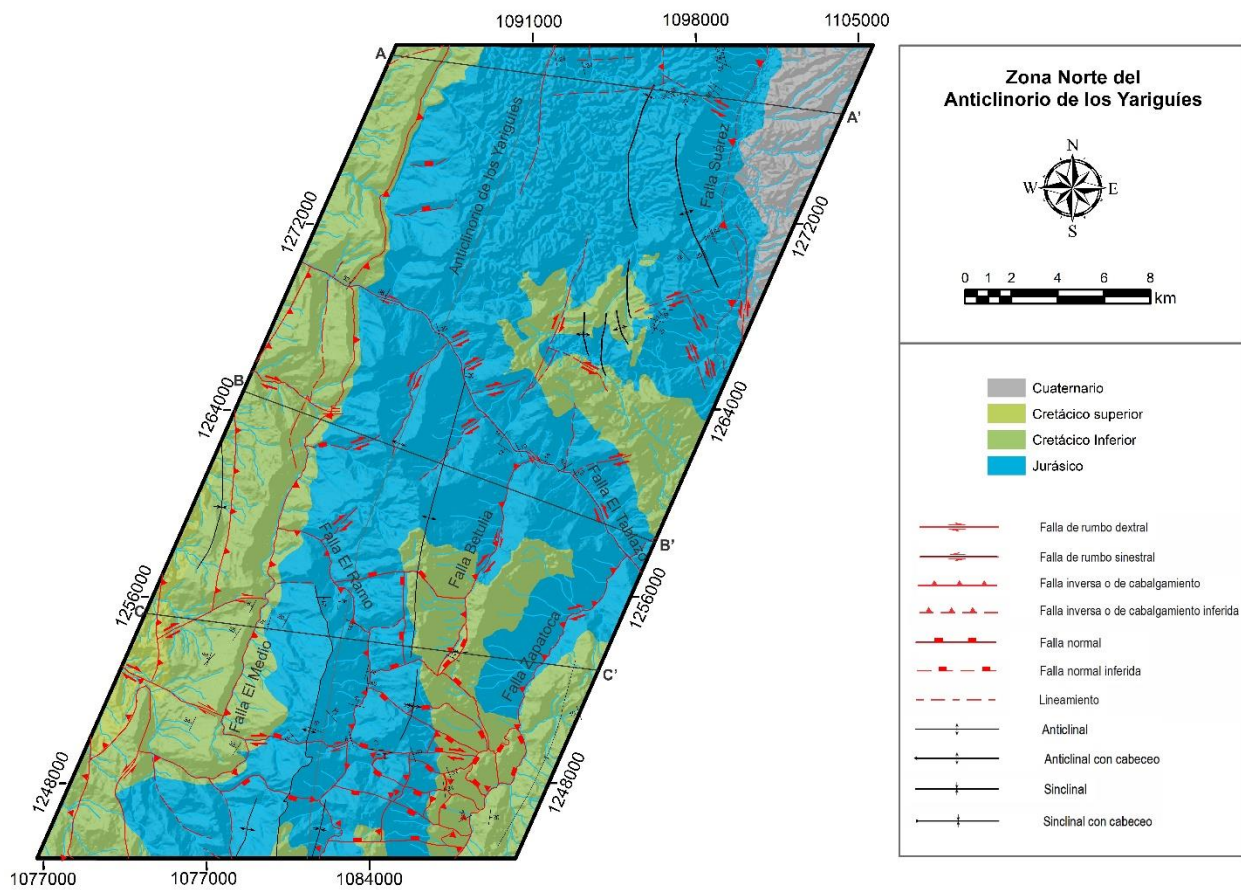
5.3.3. Ingresar los datos recolectados en campo en el software ArcGIS. Trazar los contactos litológicos, las líneas de charnela de los pliegues y las líneas de falla para la realización del mapa.

En el mapa geológico (Figura 19) realizado se encuentran fallas principales, como la Falla Suárez al NE de la zona con un componente principal inverso, la Falla El Medio que corresponde a una falla inversa, la Falla El Tablazo que se encuentra casi de manera transversal al Anticlinorio de los Yariguíes, que a partir de la elipse de deformación y campo de esfuerzos se establece una cinemática de rumbo sinistral. En el caso de La Falla de Zapatoca y la Falla de Betulia, principalmente inversas, se establece por su orientación y el campo de esfuerzos un componente en rumbo dextral en algunas zonas. En el área se encuentran otras fallas de menor incidencia regional, que en su mayoría se establecieron con componente en rumbo dextral por la elipse de

deformación. Al Sur del área de estudio también se tienen fallas normales, que en su mayoría exhiben una orientación NEE-SWW. Se pueden observar que algunas de las fallas antes determinadas en otros estudios como Osorio-Velandia (2021) al Sur de la zona de estudio no cuentan con la cinemática que se esperaría con la elipse de deformación teórica y esto puede deberse a diferentes etapas de deformación o cambio en los tensores anteriores al tensor actual.

Figura 19

Mapa geológico Zona Norte del Anticlinorio de los Yarigués



Nota. Unidades y estructuras actualizadas de la zona de estudio. Se observan las estructuras principales en la zona de estudio del Anticlinorio de los Yarigués, la Falla del Suárez, Falla El

Ramo, Falla El Tablazo, Falla El Medio, Falla Betulia, Falla Zapatoaca. Se determinan fallas en orientación NE que presentan una cinemática dextral.

5.3.4. Realizar tres cortes geológicos, perpendiculares a las estructuras, con la información determinada en la Fase 1 y 2, la estratigrafía, estructuras y cinemáticas de las estructuras, estilo estructural, modelación y la vergencia de estructuras.

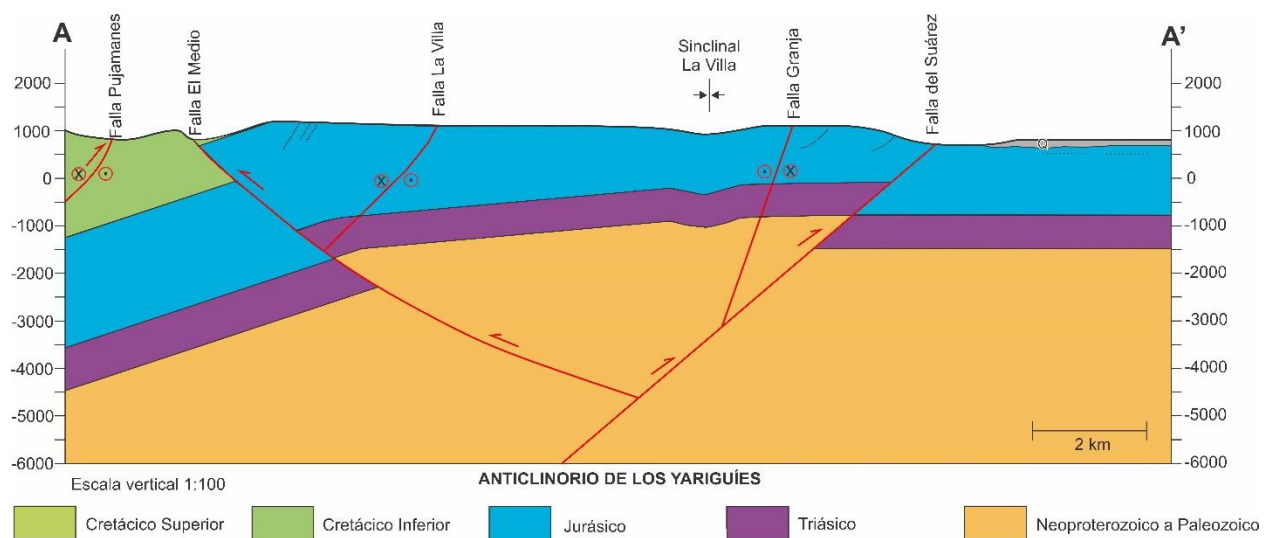
El estilo estructural de la zona de estudio comprende a niveles de despegue de las fallas en rocas del basamento, correspondiente al tipo de escamación gruesa y para las rocas del Jurásico se presenta una escamación delgada (Figura 20, Figura 21 y Figura 22). De manera general, se tienen niveles de despegue en rocas del basamento lo que corresponde a una escamación gruesa en el Anticlinorio de los Yariguíes ya que las mayorías de las estructuras de fallas, especialmente las fallas regionales como la Falla El Medio, la Falla del Suárez y la Falla de San Vicente se encuentran afectando las unidades del Neoproterozoico al Paleozoico, que corresponden a rocas del basamento como se observa en los cortes A-A', B-B' Y C-C' (Figura 20, Figura 21 y Figura 22). Esto se encuentra en concordancia con otros estudios en el cual se establecen fallas de mayor ángulo y de mayor profundidad que afectan secuencias como la del Jurásico, en este caso lo correspondiente al Grupo Girón y también fallas de menor ángulo que afectan las unidades del Cretácico (Cetina *et al.*, 2019).

Hacia la zona Norte del área de estudio, en el corte geológico A-A' (Figura 20) se observa un estilo estructural de escamación gruesa, por estructuras regionales como la Falla del Suárez y la Falla El Medio que se encuentran a mayor profundidad y afectan rocas del basamento del Neoproterozoico a Paleozoico. Estas fallas regionales tienen una cinemática inversa y una vergencia opuesta, la Falla del Suárez con vergencia al Este y la Falla El Medio con vergencia al Oeste. A menos profundidad se presenta un estilo estructural de escamación delgada por fallas de

menor profundidad con vergencia principalmente al Este y que afectan las rocas del Jurásico y Cretácico. En el corte hay tres fallas con componente de rumbo, al Oeste se encuentra La Falla Pujamanes la cual es una falla inversa dextral que corta las unidades del Cretácico, la Falla La Villa que es una falla dextral que corta unidades del Triásico y Jurásico y, hacia el Este del corte se encuentra la Falla Granja de mayor ángulo con cinemática Sinistral.

Figura 20

Corte geológico Anticlinorio de Los Yarigués (Sección A-A')



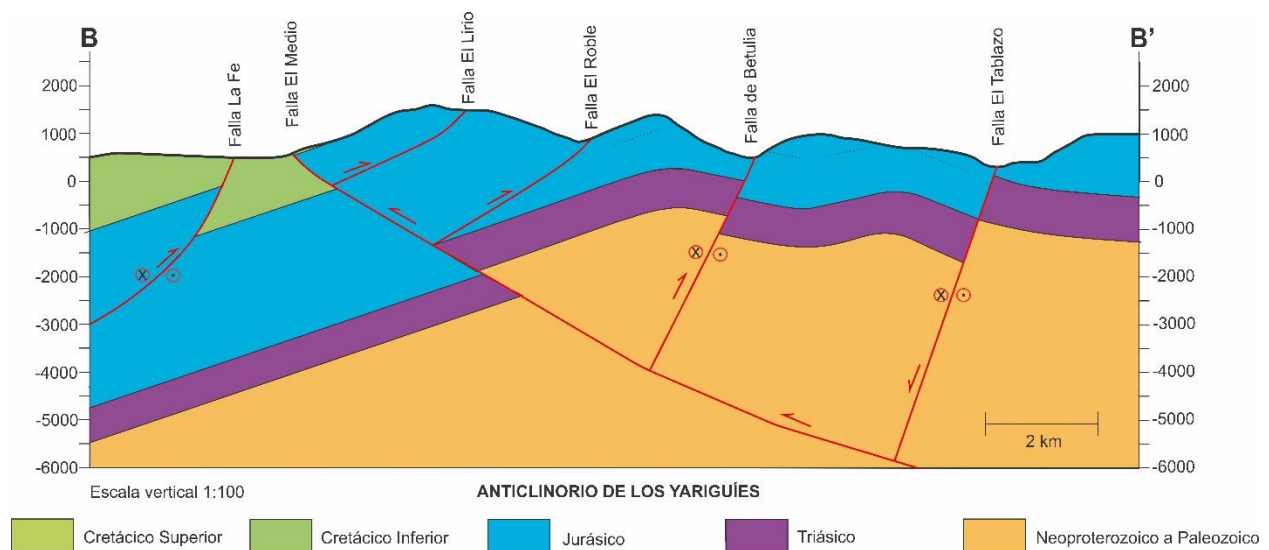
Nota. Corte A-A'. Se observa un estilo estructural de escamación gruesa a profundidad dentro de rocas del basamento, que pasa a escamación delgada en rocas del Jurásico que se encuentran a menor profundidad. El corte comprende fallas principales, las Falla del Suárez y Falla El Medio, las cuales cuentan con mayor ángulo y tienen mayor profundidad.

En inmediaciones del Río Sogamoso, corte B-B' (Figura 21), se observa un estilo estructural de escamación gruesa a profundidad evidenciada por la Falla El Medio, Betulia y El Tablazo que afectan las rocas del basamento. A menor profundidad se encuentran fallas de menor profundidad, la Falla La Fe, Falla El Lirio y la Falla El Roble que están cortando unidades del

Jurásico y, hacia el Oeste de la sección unidades del Cretácico. En este sector del área de estudio predomina la vergencia al Este, siendo excepción la Falla inversa El Medio que presenta una vergencia al Oeste. La Falla La Fe, Falla de Betulia y la Falla El Tablazo presentan un componente en rumbo dextral.

Figura 21

Corte geológico Anticlinorio de Los Yarigués (Sección B-B')



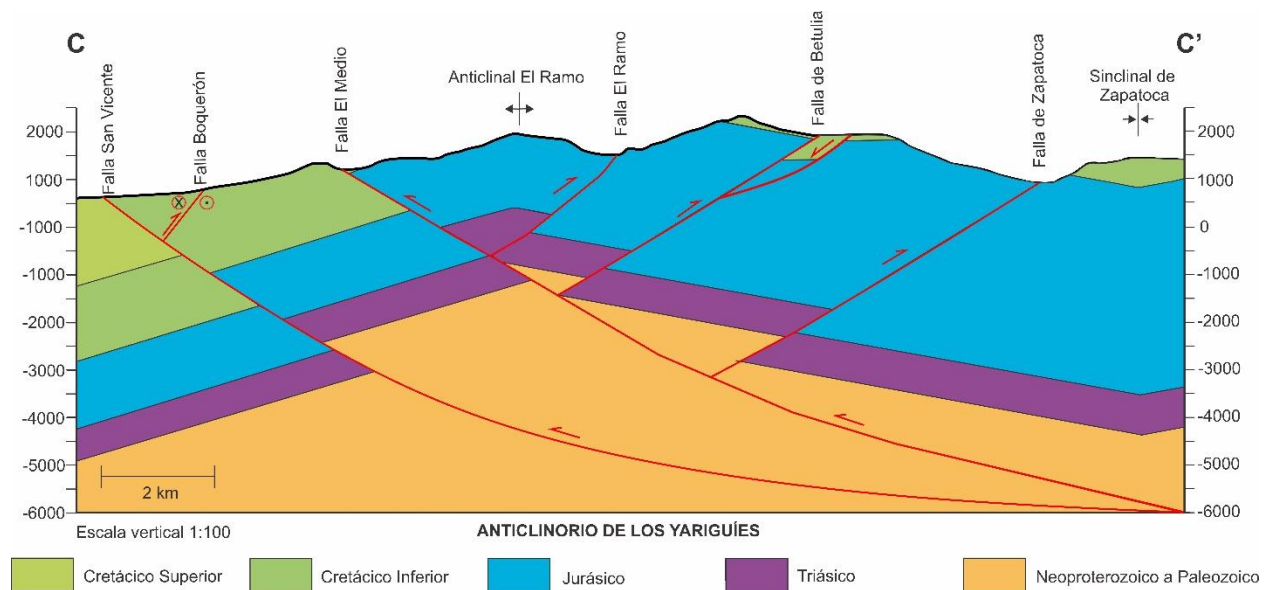
Nota. Corte B-B'. Se observa un estilo estructural de escamación gruesa a profundidad dentro de rocas del basamento, que pasa a escamación delgada en rocas del Jurásico que se encuentran a menor profundidad. El corte comprende la Falla El Medio la cual cuenta con mayor ángulo y tiene mayor profundidad y la falla de Betulia con un componente inverso dextral. El corte comprende también fallas de menor ángulo que atraviesan las unidades del Cretácico.

Al Sur de la zona de estudio, en la sección 3 (Figura 22) se tiene un estilo estructural de piel gruesa dado por fallas regionales como la Falla inversa de San Vicente con vergencia al Oeste, y piel delgada al Este de la sección dada por la Falla inversa dextral Boquerón, la cual solo afecta

unidades del Cretácico. Estructuras inversas en la zona de estudio como La Falla El Boquerón, El Ramo, Betulia y Zapatoaca tienen una vergencia al Este.

Figura 22

Corte geológico Anticlinorio de Los Yarigués (Sección C-C')



Nota. Corte C-C'. Se observa un estilo estructural de escamación gruesa a profundidad dentro de rocas del basamento, que pasa a escamación delgada en rocas del Jurásico que se encuentran a menor profundidad. El corte comprende la falla principal de San Vicente la cual cuenta con mayor ángulo y tiene mayor profundidad y es la encargada de levantar las rocas al W del Anticlinorio de los Yarigués. La Falla El Medio que también afecta el basamento y, la falla de Zapatoaca y de Betulia con un componente inverso. El corte comprende también fallas de menor ángulo que atraviesa las unidades del Cretácico como la Falla El Ramo y el Boquerón.

6. Discusión

Para la sección 1 (Figura 12), la dirección del sigma máximo horizontal (SHmax) es NEE-SWW (89°), mientras que para las secciones 2 y 3 es NWW-SEE (107°). Este cambio, o aparente rotación horaria, se puede relacionar con el incremento de estructuras en dirección NWW-SEE hacia el sur de la zona de estudio y concuerda con lo reportado por Osorio-Velandia (2021) con la rotación del campo de esfuerzos presentada en la zona, siendo así que el sigma máximo horizontal de la zona 1 se encuentra casi sin cambios en la rotación de los esfuerzos (Figura 12), se tiene una estabilidad relacionada con los tensores obtenidos, lo que indica que desde su exhumación no se han presentado cambios importantes en la rotación de esta zona, mientras que la zona 2 (Figura 14) y 3 (Figura 15) indican que se ha presentado una rotación de los esfuerzos siguiendo la dirección de las manecillas del reloj. Las zonas 2 y 3 se encuentran más relacionadas con un régimen de cizalla que al norte de la zona de estudio correspondiente a la primera zona cercana al municipio de Lebrija.

Por otro lado, se obtuvo un único tensor de esfuerzos (Figura 16) a partir de datos estriados para toda la zona de estudio (Figura 8), que en total reúne 10 de los 13 datos medidos en campo procesados. El tensor de esfuerzos resultante es de régimen de rumbo o de cizalla con SHmax NEE-SWW (85°). Se tomaron los datos obtenidos en el estudio de Osorio y Velandia (2021) y al realizar el procesamiento de los datos de estrías (N=70) se tiene un tensor de esfuerzos que varía el SHmax con una orientación E-W (176°), cambiando así el régimen a la zona de fallas normales. Probablemente estas diferencias se deban a la cantidad de datos obtenidos en campo y las zonas donde se realizaron los estudios, en este caso se toman datos nuevos por el recorrido realizado por el Río Sogamoso. A diferencia de lo reportado por Cetina *et al.*, (2019) donde se establece un

esfuerzo máximo horizontal actual de 118° al occidente del Anticlinorio de los Yariguíes, relacionado con el evento de levantamiento de la Cordillera Oriental (Caballero *et al.*, 2010).

La cinemática de las estructuras principales del área de estudio fue determinada en función de los datos de diaclasas, estrías de falla y cartografía oficial. Con respecto a las fallas, se cartografiaron como longitudinales inversas la Falla de Zapatoca, Falla de Betulia, Falla El Ramo y Falla El Medio, encontrando dentro de estas una serie de fallas transversales (Figura 19).

En el caso de los tensores de esfuerzos, se definió como tensor actual al NEE-SWW (Figura 17), encontrando que las fallas transversales se comportan como fallas normales, ya que son paralelas a subparalelas al S_H max. Además, aquellas con dirección NW-SE, se pueden comparar con la dirección de la Falla El Tablazo, y presentan una cinemática sinistral-normal, mientras que las fallas con dirección NEE-SWW tienen una cinemática dextral-normal, siendo concordante con los datos reportados por Osorio y Velandia (2021) quienes reportan un cambio en la rotación del campo de esfuerzos de NE-SW a NW-SE, lo cual podría explicar estos cambios en las direcciones de las estructuras y la cinemática correspondiente.

Estos resultados respaldan la hipótesis que asigna a las fallas transversales un comportamiento de fallas reactivadas normales como se evidenció en los Círculos de Mohr de estrías de fallas (Figura 16), que cuentan con cohesión casi nula probablemente por el tipo de material o la escala, las fallas reactivadas según su orientación (Figura 17), con componente de rumbo, sinistral o dextral en las zonas donde hay un comportamiento anormal de los estratos del flanco oriental del Anticlinorio de los Yariguíes. Las fallas longitudinales que durante el Jurásico se comportaron como normales y ahora como inversas, dado por la inversión tectónica (Osorio y Velandia 2021), tienen coherencia con los resultados, al ser parcialmente perpendiculares al tensor de esfuerzos considerado como actual (NEE-SWW) en un régimen más de cizalla. De igual manera

en estudios realizados por Machuca et al., (2021) indica que en el Anticlinorio de los Yariguíes se presentan cinemáticas de rumbo en las estructuras y un dominio más transpresivo en el área.

Este régimen explica la rotación que han presentado los bloques en la zona de estudio (Figura 18) al igual que cambios en el espesor del Grupo Girón. En el flanco occidental del Anticlinorio de Los Yariguíes se han reportado fallas transversales de rumbo dextrales que también dividen el Anticlinorio en esa zona (Cetina *et al.*, 2019). Adicionalmente, en la sección 1 (Figura 20) se encontraron estructuras como las Fallas Pujamanes y La Villa que presentan este componente en rumbo dextral, al igual que en la sección 2 (Figura 21) estructuras como La Falla La Fe, Falla de Betulia y la Falla El Tablazo y en la sección 3 (Figura 22), la Falla Boquerón, que presentan esta misma cinemática.

El estilo estructural de la zona de estudio comprende a niveles de despegue de las fallas en rocas del basamento, correspondiente al tipo de escamación gruesa y para las rocas del Jurásico se presenta una escamación delgada. De manera general, se tienen una escamación gruesa en el Anticlinorio de los Yariguíes ya que las mayorías de las estructuras de fallas se encuentran afectando las rocas del basamento. Lo anterior, se encuentra en concordancia con lo reportado por Cetina *et al.*, (2019) en el cual se establecen fallas de mayor ángulo y de mayor profundidad que afectan secuencias como la del Jurásico, en este caso lo correspondiente al Grupo Girón y también fallas de menor ángulo que afectan las unidades del Cretácico. Adicionalmente, en la zona de estudio la mayoría de las estructuras tienen una vergencia al Este (Figura 20, Figura 21 y Figura 22).

7. Conclusiones

En la zona de estudio se encontraron rocas sedimentarias siliciclásticas principalmente areniscas y conglomerados del Jurásico correspondientes al Grupo Girón, conformado por la Formación Girón o Formación Río Lebrija y la Formación Los Santos, y rocas del Cretácico correspondientes a la Formación Rosa Blanca y la Formación Paja, principalmente formadas por calizas y shales.

A partir del análisis del tensor de esfuerzos y los datos de estrías de fallas se estableció un régimen de rumbo para el Anticlinorio de los Yariguíes, lo que indica una cizalla simple o sub-simple relacionada con las fallas reactivadas transversales a esta estructura regional, como se mencionó en Jiménez *et al.*, (2022).

En la zona de estudio se encontraron fallas transversales, con una tendencia EW-NE-SW, las cuales son oblicuas a la estructura principal del Anticlinorio de los Yariguíes y según los resultados del Círculo de Mohr, se muestra que estas fallas Jurásicas normales son reactivadas, principalmente con un componente de rumbo dextral y que actúan como fallas transversales.

Los tensores de esfuerzos obtenidos con los datos de las diaclasas indican una rotación en dirección horaria en las secciones 2 y 3, relacionadas con estructuras en dirección NWW-SEE.

La elipse de deformación y los tensores de esfuerzos permitieron explicar la cinemática de las fallas principales como la Falla del Suárez y de las fallas longitudinales (Falla de Zapatoca, Falla de Betulia, Falla El Ramo y Falla El Medio). Durante el Jurásico, al estar en un régimen extensivo, se encontraban fallas normales, luego se presenta de manera regional la inversión tectónica, se da una rotación horaria de los tensores, y estas fallas normales se reactivan y tomaron un comportamiento dextral. El estilo estructural de la zona de estudio en el Anticlinorio de los

Yariguíes corresponde de manera general a una escamación gruesa, dado por las fallas regionales que se encuentran afectando las rocas del basamento.

8. Recomendaciones

Se recomienda aumentar la toma de datos de estrías de fallas por las zonas de estudio no evaluadas en este proyecto, para así complementar la información y procesamiento adecuado de los datos y estructuras. Además, se sugiere realizar una revisión de la información de sísmica o de datos adquiridos por métodos geofísicos en zonas cercanas al área de interés, para verificar el comportamiento de fallas principales, determinar estructuras y analizar los estratos.

Además, se recomienda realizar un análisis multitemporal con datos de sismos ocurridos en el área y verificar si hay relación con actividad sísmica reciente, debido a fallas reactivadas en el área de estudio o estructuras aún no cartografiadas. Así mismo, se puede evaluar si se pueden presentar riesgos por la incidencia de los sismos en las áreas cercanas a centros poblados, por la intensidad, magnitud y frecuencia de dichos sismos.

Referencias Bibliográficas

- Alarcón Gómez, Clavijo Torres, J., Mantilla Figueroa, L. C., & Rodríguez Lizcano, J. G. (2019). Estratigrafía, facies y paleoambiente de sedimentación de la Formación Jordán: un registro fluvio-lacustre con incidencia de actividad volcánica [recurso electrónico]. UIS.
- Alarcón, Clavijo-Torres, J., Mantilla-Figueroa, L. C., & Rodríguez, J. G. (2020). Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(173), 1137–1151. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1208>
- Bayona, Rapalini, A., y Costanzo-Alvarez, V. (2006). Paleomagnetism in Mesozoic rocks of the Northern Andes and its Implications in Mesozoic Tectonics of Northwestern South America. *Earth, Planets, and Space*, 58(10), 1255–1272. <https://doi.org/10.1186/BF03352621>
- Caballero, V., Parra, M. y 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.
- Caballero, V., Parra, M., Mora, A., López, C., Rojas, L., y Quintero, I. (2016). Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. 10.6084/M9.FIGSHARE.3453278.V1.
- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la cordillera Oriental. *Boletín Geológico*, 16(1–3): 5–96.

- Cetina, L.M., Velandia, F., y Patiño-Sanabria, H.A. (2019). Análisis de deformación al occidente del Anticlinorio de Los Yarigués - Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 41(3), 31-56. doi: 10.18273/revbol.v41n3-2019002.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. y Fan, J.-X. (2013). The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes* 36: 199-204.
- de esfuerzos hacia el suroriente del Macizo de Santander (Colombia). *Boletín de Geología*, 42(2), 129-145. doi: 10.18273/revbol.v42n2-2020007.
- Delvaux, D., & Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. *Geological Society special publication*, 212, 100–175. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>
- Etayo-Serna, F y Guzmán-Ospitia, G. (2019). Formación Rosa Blanca: subdivisión de la Formación y propuesta de Neoestratotipo. Sección laguna El Sapo, vereda El Carrizal, municipio de Zapatoca, departamento de Santander. En *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena, dirección científica y edición de Fernando Etayo-Serna*. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia vol. XXIII. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano
- Etayo-Serna, F. (1989). *Análisis facial del inicio del avance marino del Cretácico en la región SW del Macizo de Santander*. V Congreso Colombiano de Geología. Guía de Excursión Técnica, 41 p. Bucaramanga
- Flórez, S; Núñez Meneses, A. D., y Velandia Patiño, F. A. (2016). Análisis cinemático y estilo estructural de la Falla del Suárez entre el Hato y La Fuente, Santander [recurso electrónico]. UIS.

- Forero-Ortega, A.J.; Velandia, F.; Barragán-Coy, E.K. (2020). Estilos estructurales y tensores
- Gómez, E y Castillo, L. A. (2003). Actividad de la falla la salina a partir de instrumentación sísmológica. *Earth Sciences Research Journal*, 7, 5–12.
- Gómez, J. y Montes, N.E. (2020). *Mapa Geológico de Colombia en Relieve 2020. Escala 1:1 000 000*. Servicio Geológico Colombiano, 2 hojas. Bogotá
- Gómez, J., Montes, N.E., Nivia, Á. y Diederix, H. (2015). *Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:1 000 000*. Servicio Geológico Colombiano, 2 hojas. Bogotá
- Graterol, V. (2009). La Cordillera Oriental Sector de Soapaga y el Piedemonte de La Cordillera Oriental - Llanos Orientales, Colombia. Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). <https://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/AEROGEOFISICA%20CORDILLERA%202008.pdf>
- Hedberg, H.D. (1931). Cretaceous limestones as petroleum source rock in northwestern Venezuela *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 15:229-46.
- Jiménez, G., F. Speranza, C. Faccenna, G. Bayona, y A. Mora. (2014). Paleomagnetism and magnetic fabric of the Eastern Cordillera of Colombia: Evidence for oblique convergence and nonrotational reactivation of a Mesozoic intracontinental rift. *Tectonics*, 33, 2233–2260, doi:10.1002/2014TC003532
- Jiménez, G., García-Delgado, H., y Geissman, J.W. (2021). Magnetostratigraphy and magnetic properties of the Jurassic to Lower Cretaceous Girón Group (northern Andes, Colombia). *Geosphere*, v. 17, no. 6, p. 2172–2196, <https://doi.org/10.1130/GES02186.1>
- Jiménez, Geissman, J. W., y Bayona, G. (2022). Unraveling tectonic inversion and wrench deformation in the Eastern Cordillera (Northern Andes) with paleomagnetic and AMS data. *Tectonophysics*, 834, 229356–. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229356>

- Jimenez, López, O., Jaimes, L., & Mier Umaña, R. (2016). Variaciones en el estilo estructural relacionado con anisotropías de basamento en el Valle Medio del Magdalena. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 312–319. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.293>
- Lozano, E y Zamora, N. (2014). Compilación de la Cuenca de la Cordillera Oriental. Servicio Geológico Colombiano. Disponible en: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B20/23008100024725/Documento/Pdf/2105247251107000.pdf>
- Machuca, S., García-Delgado, H., & Velandia, F. (2021). Studying active fault-related folding on tectonically inverted orogens: A case study at the Yariguíes Range in the Colombian Northern Andes. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)*, 375, 107515-. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107515>
- Montes, Velandia, F., Osorio, J., Audemard, F., y Diederix, H. (2005). Interpretación morfotectónica de la falla Ibagué para su caracterización paleosismológica. *Boletín De Geología*, 27(1), 95–114.
- Mora, A., Horton, B., Mesa, A., Rubiano, J., Ketcham, R., Parra, M., Blanco, V., Garcia, D., y Stockli, D., (2010). Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for petroleum systems. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 94. 1543-1580. [10.1306/01051009111](https://doi.org/10.1306/01051009111).
- Moreno-Sánchez, G, Montoya-Arenas, D. M, Terraza-Melo R, Pérez-Ávila, A y Arenas-Mosquera J. E. (2019). Bioestratigrafía: Fernando ETAYO-SERNA. Mapa geológico del Valle

- Medio del Magdalena, en los alrededores del Puente El Tablazo. Escala 1:50 000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá.
- Moreno-Sánchez, G. (2019). Mapa geológico del Valle Medio del Magdalena en los alrededores del puente El Tablazo, departamento de Santander. En *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena, dirección científica y edición de Fernando Etayo-Serna*. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia vol. XXIII. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Osorio, D y Velandia, F. (2021). Late Jurassic syn-extensional sedimentary deposition and Cenozoic basin inversion as recorded in The Girón Formation, northern Andes of Colombia. *Andean Geology*, 48(2), 237–266. <https://doi.org/10.5027/andgeoV48n2-3264>
- Pfiffner. (2017). Thick-Skinned and Thin-Skinned Tectonics: A Global Perspective. *Geosciences (Basel)*, 7(3), 71–. <https://doi.org/10.3390/geosciences7030071>
- Rossello, E. (2009). Geología Estructural, Diplomado Recursos Minerales [Diapositivas de PowerPoint]. CONICET, Universidad de Buenos Aires.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., y Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19 (5), 787– 813, doi:10.1029/2000TC900004.
- Tesón, E., Mora, A., Arias, A., Namson, J., Teixell, A., Castellanos, J., Casallas, W., Julivert, M., Taylor, M., Ibañez-Mejía, M., Y Valencia, V. (2013). Relationship of Mesozoic graben development, stress, shortening magnitude, and structural style in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Geological Society of London Special Publications*. 377. 257-283. 10.1144/SP377.10.

- Velandia Patiño, F. (2017). Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga.
- Velandia, García-Delgado, H., Zuluaga, C. A., López, J. A., Bermúdez, M. A., y Audemard M, F. A. (2020). Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Northern Andes. *Journal of Structural Geology*, 137, 104087–. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104087>
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz B., J., & Restrepo A., H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1–134. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol21.1-3.1973.383>