

Análisis estructural e hidrodinámico del sistema kárstico de El Peñón, Santander-Colombia

Mauricio Sánchez Echeverry y Daniel Camilo Pulido Hernández

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogo

Director

Francisco Alberto Velandia Patiño

Geólogo, Doctor en Geociencias

Codirectora

María Alejandra Cetina Tarazona

Geóloga, Maestría en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

Agradecimiento

A los profesores Francisco Velandia y María Cetina por el apoyo y dirección que nos brindaron para el desarrollo de este proyecto, por compartir sus conocimientos y experiencia con nosotros, al grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental (GPH) por el préstamo de los equipos para realizar los aforos y las mediciones de caudal.

Un agradecimiento especial a la alcaldía del municipio de El Peñón, el proyecto parque kárstico y a la junta de acción comunal de la vereda Cruces por su apoyo en el desarrollo del proyecto. A las personas del municipio El Peñón que nos acogieron y brindaron una excelente atención durante nuestra estadía en el lugar, como el profesor Ferney Vásquez, el señor Vidal y su familia, los guías "Pipe", Silvestre, Elver y a nuestro compañero Erick Laguado quienes nos acompañaron durante las campañas de campo y a todas las demás personas que nos ayudaron a llevar a cabo este trabajo de investigación.

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo general	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2. Marco teórico	17
2.1 Karst	17
2.1.1 Exokarst	18
2.1.1.2 Dolina	18
2.1.1.3 Úvalas	19
2.2 Esfuerzo y Deformación	19
2.3 Deformación frágil	21
2.3.1 Fracturas	21
2.3.1.1 Características de las fracturas	22
2.3.1.1.1 Orientación	22
2.3.1.1.2 Longitud	22
2.3.1.1.3 Intensidad	22
2.3.1.1.4 Densidad	22
2.3.1.1.5 Conectividad	23
2.3.3 Clivaje	23
2.4 Deformación Dúctil	23
2.4.1 Estructuras de deformación dúctil	24
2.4.1.1 Pliegues	24
2.5 Análisis Estructural	25
2.5.1 Análisis geométrico	25
2.5.2 Análisis Cinemático	25
2.5.3 Análisis dinámico	26
2.6 Análisis de sistemas de fracturas	26
2.6.1 Líneas de muestreo y ventanas circulares	27
2.7 Análisis hidrodinámico de sistemas kársticos	28

3. Marco geológico	30
4. Metodología	33
4.1 Recopilación bibliográfica	34
4.2 Interpretación Fotogeológica.....	35
4.3 Trabajo de Campo	35
4.3.1 Medición de datos estructurales	37
4.3.1.1 Diaclasas	37
4.3.1.2 Indicadores cinemáticos.....	37
4.3.1.3 Clivaje y venas.....	37
4.4 Interpretación y análisis de datos	37
4.4.1 GeoRose.....	37
4.4.2 WinTensor	38
4.4.3 Stereonet	38
4.4.4 FracPaQ	38
4.4.5 Curva de calibración de caudales	40
4.4.6 Obtención del hidrograma	41
4.4.7 Curva maestra de recesión.....	42
4.4.8 Separación del flujo base (G2).	42
5. Resultados.....	42
5.1 Geología Estructural.....	43
5.1.1 Lineamientos	47
5.1.1.1 Interpretación regional de lineamientos.....	47
5.1.1.2 Interpretación de los lineamientos en la zona de estudio.....	49
5.1.2 Análisis morfométrico de las depresiones cerradas.....	50
5.1.2.1 Área.....	51
5.1.2.2 Perímetro.....	52
5.1.2.3 Longitud.....	52
5.1.2.4 Relación de alargamiento.....	53
5.1.3 Análisis de orientaciones	55
5.1.3.1 Análisis de la orientación de diaclasas.....	55
5.1.3.2 Análisis de la orientación de los planos de clivaje.	56

5.1.3.3	Análisis de orientaciones de venas.	56
5.1.3.4	Análisis de la orientación de los planos de estratificación.	57
5.1.3.5	Análisis de orientaciones de depresiones cerradas.	58
5.1.3.6	Análisis de orientaciones de ejes de pliegues.	58
5.1.3.7	Análisis de orientaciones de drenajes.	59
5.1.4	Análisis cuantitativo de las fracturas	60
5.1.4.1	Atributos geológicos.	60
5.1.4.2	Orientación a escala de afloramiento.	60
5.1.4.3	Análisis de densidad, intensidad y longitud de fractura.	62
5.1.4.3.1	Longitud Promedio.	63
5.1.4.3.2	Intensidad y Densidad.	64
5.1.4.3.3	Conectividad.	66
5.1.5	Análisis Cinemático.	67
5.1.5.1	Estimación de tensores por estación.	68
5.1.5.2	Estimación del tensor regional.	73
5.1.6	Direcciones potenciales del flujo del agua	75
5.2	Análisis hidrodinámico	75
5.2.1	Precipitación de la zona de estudio.	76
5.2.2	Hidrodinámica del sistema kárstico en la salida de la Cuevas Las Sardinas.	78
5.2.2.1	Curva de calibración	78
5.2.2.2	Caudales.	79
5.2.2.3	Determinación de la fracción flujo base.	82
5.2.3	Análisis espacial de caudales.	83
5.2.4	Parámetros fisicoquímicos.	85
6.	Discusiones	88
7.	Conclusiones	91
8.	Recomendaciones	93
	Referencias Bibliográficas	94

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación usada para la longitud de las fracturas	22
Tabla 2. Clasificación de dolinas de acuerdo con relación de alargamiento de los ejes.....	54
Tabla 3. Resumen de parámetros morfométricos	55
Tabla 4. Atributos geológicos de las estaciones de FracPaQ.....	60
Tabla 5. Medidas de intensidad, densidad y longitud promedio.....	63
Tabla 6. Síntesis de los resultados obtenidos en el procesamiento de los tensores por estación..	73
Tabla 7. Síntesis de los resultados obtenidos en el procesamiento individual de los planos por de clivaje, venas y diaclasa.....	74
Tabla 8. Caudales y niveles de la quebrada saliente de la cueva Las Sardinas	79
Tabla 9. Periodos de recesión	81
Tabla 10. Análisis espacial de caudales en la cuenca hidrográfica.....	84
Tabla 11. Síntesis de mediciones de parámetros fisicoquímicos en los puntos de muestra	87

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del área de estudio.....	12
Figura 2. Representación de un macizo kárstico	18
Figura 3. Dolinas según su génesis	19
Figura 4. Campo de esfuerzos ejercido sobre un cuerpo	20
Figura 5. Estructuras formadas según el campo de esfuerzos	21
Figura 6. Disposición de las fracturas de acuerdo con el eje del pliegue	24
Figura 7. Línea de muestreo y ventana circular	27
Figura 8. Intensidad y densidad de fracturamiento	27
Figura 9. Hidrograma.....	29
Figura 10. Mapa geológico	31
Figura 11. Esquema metodológico	34
Figura 12. Frecuencias de la longitud de trazas y Frecuencias de la longitud de segmentos	39
Figura 13. Mapa Patrón fracturas y diagrama ternario de conectividad	40
Figura 14. Mapa geológico con estructuras	43
Figura 15. Corte geológico	44
Figura 16. Venas sigmoidales de calcita en forma de z.....	45
Figura 17. Clivaje.....	46
Figura 18. Venas	46
Figura 19. Pliegues de gravedad en los planos de clivaje.....	47
Figura 20. Interpretación de los lineamientos regionales	48

Figura 21. Diagrama rosa de los lineamientos regionales	49
Figura 22. Interpretación lineamiento de la zona de trabajo.....	49
Figura 23. Diagrama rosa de los lineamientos de la zona de estudio	50
Figura 24. Mapa de depresiones cerradas de la zona de trabajo.....	51
Figura 25. Histograma de area	52
Figura 26. Histograma de perímetro	52
Figura 27. Histograma de longitud del eje mayor.....	53
Figura 28. Histograma de longitud del eje menor.....	53
Figura 29. Clasificación de forma de las depresiones cerradas de la zona de estudio.....	54
Figura 30. Diagrama rosa y diagrama de densidad de polos de los planos de diaclasa.....	56
Figura 31. Diagrama rosa y diagrama de densidad de polos de los planos de clivaje	56
Figura 32. Diagrama rosa y diagrama de densidad de polos de los planos de venas.....	57
Figura 33. Diagrama rosa y diagrama de densidad de polos de la estratificación	57
Figura 34. Diagrama rosa de los ejes mayores de las depresiones cerradas	58
Figura 35. Diagrama rosa de ejes de pliegues.....	59
Figura 36. Diagrama rosa de ejes de drenajes.....	59
Figura 37. Mapa de diagramas rosa por estación de FracPaQ.....	61
Figura 38. Diagrama rosa de diaclasas medidos en campo y por FracPaQ	62
Figura 39. Gráfico de dispersión de longitud.....	64
Figura 40. Mapa de intensidad por estaciones	65
Figura 41. Mapa de densidad por estaciones	66
Figura 42. Mapa de conectividad por estación	67
Figura 43. Tensores obtenidos por estación.....	69

Figura 44. Mapa de tensores por estaciones	72
Figura 45. Tensores de esfuerzo regionales	74
Figura 46. Mapa de ubicación del estudio hidrodinámico	76
Figura 47. Hietograma de la estación de Bolívar.....	77
Figura 48. Curva de calibración.....	79
Figura 49. Caudales cada media hora versus lluvia estación de Bolívar entre el 18 de septiembre de 2022 hasta el 23 de enero de 2023	80
Figura 50. Caudales cada media hora versus lluvia estación de El Peñón entre el 18 de Septiembre de 2022 hasta el 23 de enero de 2023	80
Figura 51. Curva maestra de recesión.....	82
Figura 52. Separación del flujo base a partir del algoritmo Nathan y McMahon Paso 1	83
Figura 53. Mapa de análisis temporal de caudales	84
Figura 54. Mapa de puntos de medición de hidroquímica.....	86

Resumen

Título: Análisis estructural e hidrodinámico del sistema kárstico de El Peñón, Santander-Colombia.

Autores: Mauricio Sanchez Echeverry, Daniel Camilo Pulido Hernández.

Palabras Clave: Karst, Hidrodinámica, FracPaQ, Sistema de fracturas, Dolina, Análisis Cuantitativo.

Descripción: El sistema kárstico El Peñón está localizado en el sector NE de los municipios de El Peñón y Bolívar en la parte suroccidental del departamento de Santander. El karst desarrollado sobre las rocas de la Formación Rosa Blanca está controlado estructuralmente por diaclasas y clivaje, configurando zonas favorables para la infiltración del agua y acelerando los procesos de karstificación, que contribuye a la formación de expresiones geomorfológicas endo y exokársticas como dolinas y cavidades, entre otras geoformas típicas de este ambiente. Se realizó un análisis morfométrico de las depresiones cerradas (dolinas y úvalas) y un análisis cuantitativo de las fracturas de la zona mediante el uso del software FracPaQ, que permitió determinar las orientaciones principales, cuantificar la longitud, intensidad, densidad y conectividad de las discontinuidades y el cálculo de tensores por medio de la inversión de datos de diaclasas, venas y clivaje medidos en campo. La hidrodinámica del sistema kárstico en la cuenca hidrográfica situada al NW de la zona de estudio se realizó por medio del análisis de datos de caudales, obtenidos en la salida de la cueva Las Sardinas y datos de lluvia. Estos datos permitieron conocer la respuesta del medio kárstico ante los eventos de precipitación. Como conclusión del trabajo se establecen las orientaciones principales de las estructuras, encontrando una relación entre la dirección de los sistemas de fractura y las cavidades kársticas. Se obtuvo un nuevo tensor regional con dirección NW-SE 127° y tensores locales que comparten la misma dirección. Así mismo, se obtuvo valores de intensidad intermedios y una densidad de fracturamiento predominantemente baja, con una buena conectividad entre los planos de fractura. Finalmente, se establece que el sistema kárstico El Peñón está bien desarrollado debido a la respuesta rápida de caudales ante los eventos de precipitación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Geología. Programa académico. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño. Doctor en Geociencias. Codirector: María Alejandra Cetina Tarazona. Maestría en Ingeniería Civil

Abstract

Title: Structural and hydrodynamic analysis of the karst system of El Peñón, Santander-Colombia.

Author: Mauricio Sanchez Echeverry, Daniel Camilo Pulido Hernández.

Key Words: Karst, Hydrodynamic, FracPaQ, Fracture System, Doline, Quantitative Analysis.

Description: El Peñón karst system is in the NE sector of the municipalities of El Peñón and Bolívar in the southwestern part of the department of Santander. The karst developed on rocks of the Rosa Blanca Formation is structurally controlled by diaclasses and cleavage, configuring favorable zones for water infiltration and accelerating karstification processes, which contributes to the formation of endo- and exokarstic geomorphological expressions such as dolines and cavities, among other geoforms typical of this environment. A morphometric analysis of the closed depressions (dolines and uvalas) and a quantitative analysis of the fractures in the area were carried out using the FracPaQ software, which allowed determining the main orientations, quantifying the length, intensity, density and connectivity of the discontinuities and the calculation of tensors by means of the inversion of data of diaclasses, veins and cleavage measured in the field. The hydrodynamics of the karst system in the hydrographic basin located to the NW of the study area was carried out by means of the analysis of flow data, obtained at the outlet of Las Sardinias cave and rainfall data. These data made it possible to determine the response of the karst environment to precipitation events. As a conclusion of the work, the main orientations of the structures were established, finding a relationship between the direction of the fracture systems and the karst cavities. A new regional tensor with NW-SE 127° direction and local tensors sharing the same direction were obtained. Likewise, intermediate intensity values and a predominantly low fracture density were obtained, with good connectivity between fracture planes. Finally, it is established that the El Peñón karst system is well developed due to the rapid response of flows to precipitation events.

* Degree Work

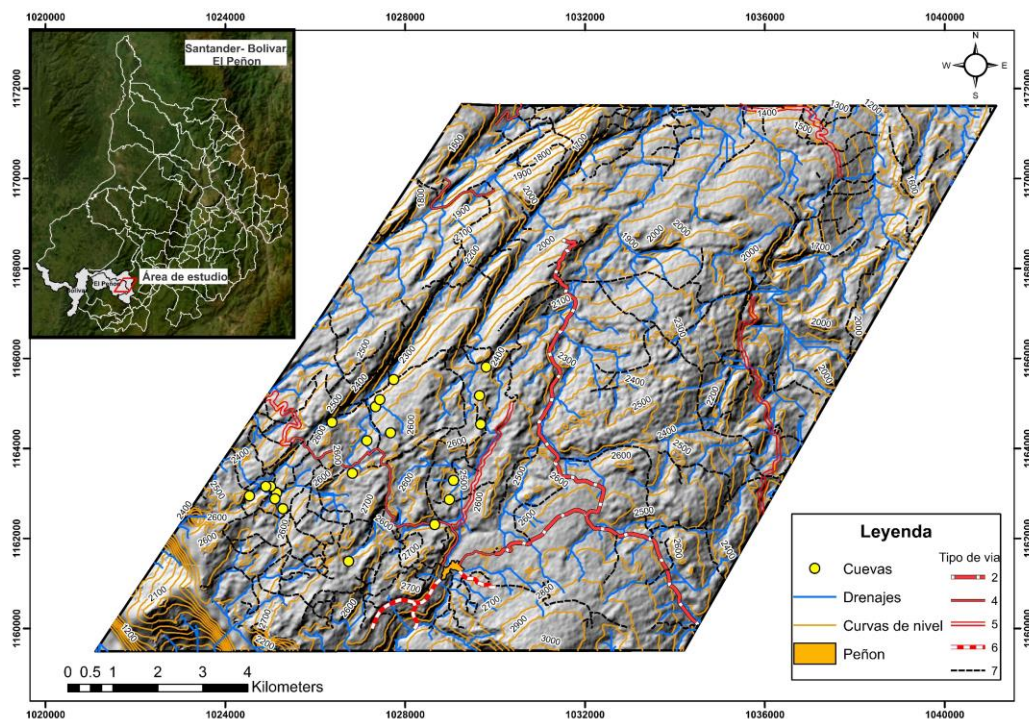
** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Academic program. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño. Ph.D. in Geosciences. Co-director: María Alejandra Cetina Tarazona. Master's Degree in Civil Engineering.

Introducción

El área de estudio se encuentra localizada al noreste de los municipios de El Peñón y Bolívar (provincia de Vélez), situado sobre la Cordillera Oriental de los Andes, al sur oriente del departamento de Santander. Los municipios más cercanos que limitan con los mencionados son Landázuri, La Belleza, Cimitarra y Sucre. El sector norte del municipio se encuentra cartografiado en plancha 150 Cimitarra del Servicio Geológico Colombiano (Gómez *et al.*, 2008).

Figura 1

Localización del área de estudio



Nota. Se muestra la ubicación de las cuevas y cavernas principales de la zona. Información cartográfica del IGAC.

El agua subterránea de regiones kársticas abastece alrededor del 20-25% de la población mundial (Ford & Williams, 2007). El Peñón es una de las regiones con desarrollo de paisaje kárstico más relevantes de Santander que posee una gran riqueza hídrica superficial y subterránea,

considerándose como un área de recarga hidrogeológica y una importante fuente de recursos hídricos para el departamento y el país. Esta región presenta elevaciones entre los 2600 a 3000 msnm con ecosistemas de Bosque Andino y zonas de subpáramo (Mendoza y Aguilar, 2019).

En la zona de estudio afloran principalmente rocas calcáreas de la Formación Rosa Blanca compuesta por calizas y lodolitas calcáreas con un espesor que varía entre 400 y 502 m. Estas se encuentran afectadas por las siguientes estructuras regionales: Anticlinales de Portones y Los Medios, Sinclinal de Panamá y Falla de San Cayetano (Figura 10). Las expresiones geomorfológicas desarrolladas por esta unidad en la zona son resultado de la interacción de factores atmosféricos (como la humedad y la precipitación), litológicos y estructurales que configuran el paisaje kárstico.

El estado de conocimiento geológico actual es escaso debido a los problemas de orden público que han dificultado el acceso para la realización de investigaciones en la región. Actualmente, se cuenta con los estudios realizados por parte de Gómez *et al.* (2008) de la cartografía y muestreo geoquímico a escala 1:100.000 de la plancha 150 Cimitarra del Servicio Geológico Colombiano, en este trabajo proponen un tensor local de 142° (NW-SE) para la región de los anticlinales Los Portones, Los Medios y Los Cobardes. Barajas y Gelvez (2019) realizan una valoración del patrimonio geológico de algunas cuevas y cavernas de la zona y resaltan el control estructural del paisaje kárstico evidenciado en las orientaciones preferenciales que adquieren las geoformas endo y exokársticas, identificando dos direcciones (NE-SW y NW-SE) para los ejes mayores de dolinas y cuevas; además, propusieron un tensor local de 136° (NW-SE) que permite explicar las estructuras plegadas y la relación de perpendicularidad entre las fracturas de la zona. También García *et al* (2022) determinan un tensor 118° a partir de la inversión de las soluciones de mecanismos focales de terremotos superficiales (<50 km) para este sector de la

cordillera oriental. No obstante, los tensores mencionados fueron calculados con base en estructuras de mapas en escala 1:100.000 y con las orientaciones de los pasajes de cuevas y ejes mayores de dolinas y mecanismos focales, respectivamente, los cuales son indicadores muy regionales. Para comprender el control estructural en el sistema kárstico e hidrogeológico es importante calcular un tensor en detalle a partir de datos medidos en planos y estructuras a escala meso, tales como diaclasas, clivaje, planos estriados y venas.

Mantilla *et al.*, (2003) reportan que las rocas de la Formación Rosa Blanca presentan una foliación secundaria denominada “slaty cleavage” que es evidenciado en afloramientos estudiados en el sector de Vélez, Bolívar y Guavatá, sin embargo, no se ha realizado la medición de dichos planos para conocer su orientación. Rodríguez y Lasso (2019) realizan un estudio de la hidroquímica en las cuevas y cavernas de la región, aportando información de los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea, no obstante, en la zona de interés no se han realizado aún investigaciones a nivel de la hidrodinámica del sistema kárstico y su respuesta ante los eventos de precipitación, donde el sector más favorable para llevar a cabo este estudio corresponde al occidental debido a la presencia de drenajes que atraviesan las cavidades y a la cercanía de la estación meteorológica ubicada en la vereda Cruces.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente. El estudio detallado de la geología estructural aportaría para el entendimiento de la deformación en el área de El Peñón y el control en la configuración del paisaje kárstico e hidrodinámica. Se plantean las siguientes hipótesis.

- Existe una relación entre la orientación de las estructuras geológicas y la dirección de las cavidades subterráneas en la zona de estudio.

- Las direcciones de flujo del agua en el sistema kárstico están dominadas por la orientación de los principales patrones de fracturas y por el buzamiento de los estratos de la Formación Rosa Blanca.
- El buen desarrollo del karst permite una respuesta rápida de la descarga de los sistemas subterráneos ante los eventos de precipitación y una baja evolución geoquímica del agua subterránea.

Con base en las ideas anteriormente mencionadas, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es la relación entre las direcciones de fractura, clivaje, buzamiento de los estratos y las direcciones de flujo del agua y con la orientación de las cavidades kársticas en la zona de estudio?
- ¿Existe una conexión (conectividad) entre los sistemas de fracturas abiertas en el área de estudio que facilite el flujo del agua en el sistema kárstico?
- ¿Cuál es el tensor de esfuerzos local que explica las orientaciones principales de las estructuras geológicas de la zona?
- ¿Qué comportamiento hidrodinámico presenta el sistema kárstico en el sector occidental de la zona de estudio ante la precipitación?
- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas en la zona de estudio y la correlación espacial entre los afloramientos de agua?

La realización de este trabajo de investigación parte de la necesidad de conocer cómo funciona el sistema hídrico del ambiente plegado, fracturado y kárstificado de El Peñón, incluyendo el comportamiento hidrodinámico subterráneo en términos de su respuesta a la precipitación. Los resultados serán una contribución a la gestión del recurso hídrico, la protección

del patrimonio geológico y la biodiversidad de la zona ante su exposición a actividades turísticas en cuevas y cavernas, uso del suelo y subsuelo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar y caracterizar la geología estructural y el funcionamiento hidrodinámico del sistema kárstico de El Peñón.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar una interpretación de las estructuras regionales, sistemas de fracturas y clivaje de la zona de estudio y sus alrededores con base en imágenes de satélite, modelos de elevación digital y mapas geológicos existentes.
- Establecer tensores de esfuerzo y orientaciones preferenciales del sistema de fracturas en la zona de estudio.
- Realizar la cartografía de dolinas para analizar la relación de las orientaciones de sus ejes mayores y su correspondencia con las estructuras mayores de la zona de estudio.
- Identificar potenciales direcciones de flujo del agua por medio del tensor de esfuerzo y las orientaciones principales de los sistemas de fractura.
- Determinar el comportamiento hidrodinámico en el sector occidental la zona de estudio, desde la precipitación hasta la descarga, con base en el análisis de hidrogramas.
- Caracterizar las aguas subterráneas de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas, a partir de mediciones de campo, con el fin de establecer correlaciones en la zona.

2. Marco teórico

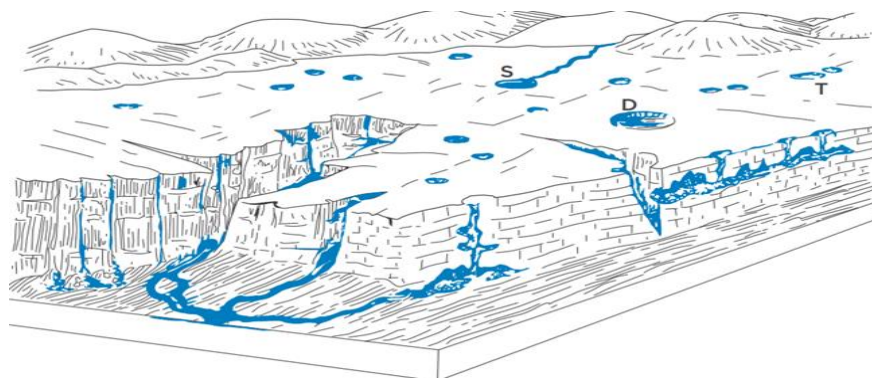
2.1 Karst

El término karst es utilizado para describir un estilo especial de paisaje que tiene una hidrología distintiva y geoformas típicas (Figura 2) que se forman como resultado de la alta solubilidad de las rocas y un buen desarrollo de porosidad secundaria (Ford & Williams, 2007). La distribución de los caracteres kársticos y su evolución dependen de la interrelación entre factores intrínsecos (tipo de litología, estructura, estratificación) y extrínsecos (clima, relieve, tiempo) (Andreu *et al.*, 2016). De las regiones kársticas se recalca que cubren alrededor de un 15-20% de la superficie terrestre (Jones & White, 2019) y que entre un 20-25 % de la población mundial depende del suministro del agua subterránea que allí se genera. (Ford & Williams, 2007).

El control tectónico es el factor más importante para el desarrollo del sistema kárstico de una región, éste va a estar dado por fallas y diaclasas que van a servir como zonas de infiltración de agua en el macizo rocoso y acelerar de esta manera los procesos erosivos y de disolución mineral. Las zonas de mayor deformación estructural son las que presentan condiciones más favorables para el desarrollo de los sistemas kársticos (Rodríguez y Lasso, 2019). Quinif y Vandycke (2001) señalan que la tectónica controla las direcciones principales de los sistemas kársticos y determina los límites mecánicos a la expansión kárstica. En adición, cabe resaltar que el fracturamiento neotectónico en estas regiones, en especial en los karst recientemente activos, es uno de los parámetros importantes que controlan el movimiento del agua subterránea y el desarrollo de sistemas endokársticos. Las fracturas orientadas perpendicularmente a la tensión principal mínima son el camino más conveniente para el flujo de agua subterránea en macizos kársticos (Shanov & Kostov, 2015).

Figura 2

Representación de un macizo kárstico



Nota. (S) Sumideros (T) lagos (D) Dolinas. Tomado de Meléndez y Fuster (1975) modificado por Lasso *et al.* (2019).

2.1.1 Exokarst.

En la superficie de la Tierra, los rasgos kársticos se manifiestan a escalas de decenas de kilómetros a milímetros. Los fenómenos kársticos superficiales, exokársticos, son creados por los efectos disolventes de las precipitaciones (Bögli, 1980). Las formas exokársticas pueden dividirse en función de la escala de observación en formas a pequeña escala (genéricamente denominadas lapiaz o karren), a escala intermedia (dolinas) y a gran escala como alguna corriente fluvial (valles secos) o el curso fluvial que se infiltra en un sumidero (valle ciego) (Andreu *et al.*, 2016).

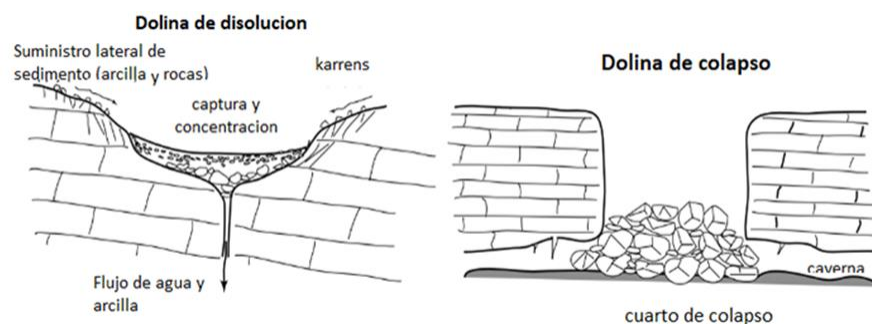
2.1.1.2 Dolina. Se define como una depresión cerrada de tamaño pequeño o mediano (pocos metros a 1 km de diámetro) de morfología circular o elíptica y donde su fondo actúa como sumidero por donde el agua se introduce en el interior del karst. Su origen puede ser diverso, lo que ha originado una amplia propuesta de tipologías, pero las más frecuentes son las originadas por disolución, subsidencia y colapso (Andreu *et al.*, 2016). Se pueden presentar aisladas o agrupadas conformando un campo de dolinas (Gutiérrez, 2008). Generalmente alineadas con fallas

o fracturas importantes, las dolinas son a menudo alargadas en el rumbo de las fallas, y también ocurren comúnmente en la intersección de dos o más fallas (Radulovic, 2013).

Desde el punto de vista genético Kramer (1941) (como se citó en Gilli, 2015) distingue las dolinas de disolución y las dolinas de colapso (Figura 3).

Figura 3

Dolinas según su génesis



Nota. Tomado de Gilli (2015).

2.1.1.3 Úvalas. Son depresiones de aspecto alargado y contornos irregulares con diámetros superiores a los 500 m, parecen formarse por la coalescencia de dolinas que crecen próximas y se desarrollan rápidamente en anchura respecto de la profundidad (Fernández, 1995). El eje más largo de úvalas está a menudo en paralelo con la dirección de fallas y sinclinales (Radulovic, 2013).

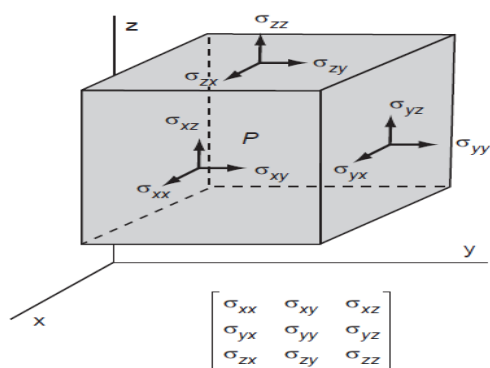
2.2 Esfuerzo y Deformación

El esfuerzo en una superficie es un vector que se puede definir como la relación entre la fuerza que está siendo aplicada y el área sobre la que actúa esta (Figura 4) (Fossen, 2010). Se define entonces el estado de esfuerzo como el conjunto de los infinitos vectores que actúan sobre los planos infinitos que pasan por un punto en un sistema tridimensional en un instante dado. Esto ya no es una magnitud vectorial, sino una cantidad física compuesta de infinitos vectores, que se denomina tensor de esfuerzo (Martínez, 2002). Los esfuerzos normales a los planos se denominan esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 , σ_3), estos son perpendiculares entre sí y configuran la denominada

elipse de esfuerzos que describe de forma sencilla la magnitud y orientación de los esfuerzos que están actuando sobre un cuerpo (Davis *et al.*, 2011).

Figura 4

Campo de esfuerzos ejercido sobre un cuerpo



Nota. Tomado de Davis et al. (2011).

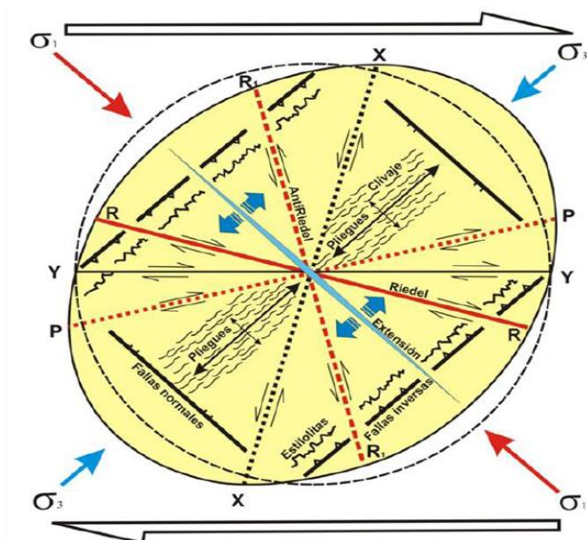
La deformación es la transformación de una geometría inicial a una final por medio de traslación, rotación o distorsión y/o cambio de volumen de un cuerpo rígido. Las rocas pueden entenderse como un cuerpo rígido y por ende sufren deformación brindando información acerca de los campos de esfuerzos a los que han estado sometidas.

Las deformaciones son causadas por esfuerzos, de forma que ambos conceptos están ligados por una relación de causa y efecto. Aparte de ser conceptos distintos, hay una diferencia en el tratamiento de unos y otras que merece la pena destacar: los esfuerzos se definen y se analizan para un instante dado, mientras que las deformaciones miden cambios producidos en un intervalo de tiempo y se analizan comparando un estadio final con uno inicial (Martínez, 2002).

En la Figura 5 se puede evidenciar el campo de esfuerzos que deja como resultado la elipse de deformación y las posibles estructuras que se pueden generar de acuerdo con la orientación de los esfuerzos principales.

Figura 5

Estructuras formadas según el campo de esfuerzos



Nota. Tomado de Rossello (2010).

2.3 Deformación frágil

La deformación frágil es un cambio permanente en la corteza superior que se forma en áreas donde la tensión se acumula a niveles que exceden la resistencia local a la ruptura en la corteza generando un fracturamiento localizado (Fossen, 2010). Dentro de las estructuras de deformación frágil se encuentran las fracturas y las fallas.

2.3.1 Fracturas

Según Fossen (2010), una fractura es cualquier discontinuidad planar o subplanar visible que se forma como resultado de esfuerzos internos o externos y que generalmente implican reducción o pérdida de cohesión. Las fracturas pueden ser de extensión o también llamadas fracturas abiertas dentro de las cuales se encuentran diaclasas, venas y fisuras (Figura 5), este tipo de fracturas se caracteriza por ser paralelas o subparalelas con el tensor de esfuerzos, en contraste si dicho tensor es perpendicular se van a generar fracturas cerradas como estilolitos y si el tensor es oblicuo se pueden generar fracturas de cizallamiento. La mayoría de las rocas poseen fracturas

y otras discontinuidades que facilitan el almacenamiento y movimiento de fluidos a través de ellas. (Singhal y Gupta, 2010).

2.3.1.1 Características de las fracturas

2.3.1.1.1 Orientación. Es el parámetro empleado para definir un único plano de fractura en el espacio, utilizando relaciones angulares, como para cualquier superficie geológica plana, se define en términos de rumbo y buzamiento. Con el fin de representar las orientaciones principales de un set de fracturas se utilizan la proyección estereográfica y el diagrama de rosa principalmente (Singhal y Gupta, 2010).

2.3.1.1.2 Longitud. También denominado persistencia, es una medida del grado de desarrollo de la superficie de discontinuidad (Singhal & Gupta, 2010). Para clasificar las fracturas de acuerdo con su longitud se emplea la propuesta por Barton (1978) en la Tabla 1.

Tabla 1

Clasificación usada para la longitud de las fracturas

Fractura	Longitud m
Muy Pequeña	<1
Pequeña	1-3
Media	3-10
Grande	10-20
Muy grande	>20

Nota. Modificado de Barton (1978).

2.3.1.1.3 Intensidad. Se define como el número de discontinuidades por unidad de longitud, medidas a lo largo de una línea, área o volumen (Singhal & Gupta, 2010).

2.3.1.1.4 Densidad. La densidad de fracturas corresponde al grado de fracturamiento de la roca. Hace referencia a el número de fracturas por unidad área (Singhal & Gupta, 2010).

2.3.1.1.5 Conectividad. Es definida por la intersección de discontinuidades, la cual es importante ya que el flujo de agua subterránea tiene lugar a través de múltiples fracturas. Una mayor intercomunicación continua entre la red de fracturas es proporcionada por un mayor grado de fracturamiento. La conectividad de fractura se incrementa con el aumento de la longitud y su densidad, a medida que aumenta la probabilidad de fractura intersecada (Singhal & Gupta, 2010).

2.3.2 Fallas

Las fallas son fracturas de cizalla con un movimiento relativo apreciable. Según Davis *et al.* (2011) de acuerdo con la ley de Anderson las fallas pueden clasificarse en tres tipos a partir de la inclinación que tenga el plano de fractura con respecto a la horizontal y máximo esfuerzo compresivo. Fallas normales que presentan una inclinación mayor de 45° con un tensor σ_1 vertical, fallas inversas que poseen una inclinación menor de 45° con un tensor σ_3 vertical y fallas de rumbo con inclinación cercana a 90° y un tensor σ_2 vertical.

2.3.3 Clivaje

El clivaje es una estructura planar penetrativa que ha sido definida por Fossen (2010) como la capacidad que tiene una roca de dividirse en superficies más o menos paralelas. El clivaje puede verse desde escalas micro a regionales, y puede permitir a través de sus planos de debilidad el paso de fluidos.

2.4 Deformación Dúctil

Es una deformación continua que sufren los cuerpos rocosos. Según Martínez (2002) puede subdividirse en elástica y permanente. Deformación elástica es aquella en la cual se produce deformación por aplicación de un campo de esfuerzos, pero si los esfuerzos se retiran, la deformación se pierde, recuperando el cuerpo su forma original. Las deformaciones plástica y

viscosa son dos tipos de deformación continua en los que ésta permanece aun cuando el esfuerzo sea retirado, por lo que se denomina deformación permanente.

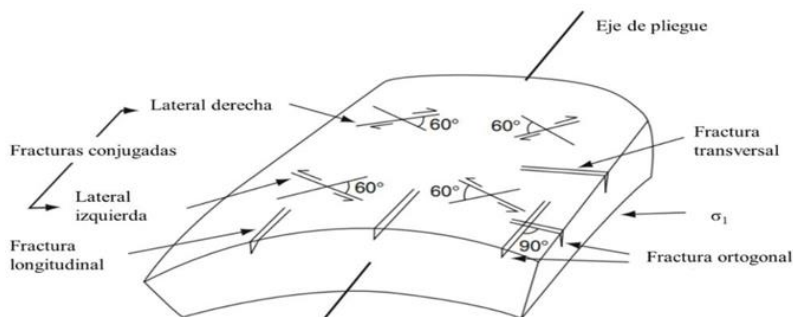
2.4.1 Estructuras de deformación dúctil

2.4.1.1 Pliegues. los pliegues son estructuras de deformación dúctil que se forman cuando las estructuras inicialmente planas se curvan (Fossen, 2010); son estructuras en rocas deformadas, que afectan a capas individuales o múltiples en todas las escalas (Hudlestone & Treagus, 2010). Dentro de estos podemos encontrar anticlinales, sinclinales, monoclinales, homoclinales, anticlinorios y sinclinorios entre otros.

Los dos tipos de deformación pueden ser coexistentes, por lo cual es posible encontrar zonas donde hay estructuras en dúctil afectadas por unas de deformación frágil, como, por ejemplo, las fracturas que se generan en los flancos y charnelas de pliegues. En la Figura 6 se observa la relación entre las fracturas y el pliegue. Hay dos conjuntos de fracturas por cizallamiento oblicuo que muestran una tendencia lateral izquierda y lateral derecha, adicionalmente se encuentran dos conjuntos de fracturas por tensión que son ortogonales, las fracturas longitudinales y las transversales (Singhal & Gupta, 2010).

Figura 6

Disposición de las fracturas de acuerdo con el eje del pliegue



Nota. Relación entre el plegamiento junto a los sistemas de fractura y la orientación del campo de esfuerzos. Tomado de Singhal & Gupta (2010).

2.5 Análisis Estructural

El análisis estructural es el estudio de la deformación que se observa en los cuerpos geológicos con el fin de entender su evolución, para ello se puede hacer uso de métodos como cartografía de estructuras, descripción e interpretación de la deformación (cuando sea posible), así como explicar su origen a través de la mecánica y la tectónica (Davis, 2011).

Según Fossen (2010) el análisis estructural se compone de análisis geométrico, cinemático y dinámico.

2.5.1 Análisis geométrico

En este análisis se observa la forma, orientación geográfica, tamaño y relación geométrica entre las estructuras principales y las estructuras de segundo orden relacionadas. En este tipo de análisis se usan herramientas de interpretación de datos como diagramas rosas y proyecciones estereográficas.

Diagramas Rosa: los diagramas de rosa representan estadísticamente las tendencias principales de la orientación de los planos de fracturas medidos (strike).

Proyecciones estereográficas: las proyecciones estereográficas son una herramienta fundamental para representar datos estructurales tridimensionales en una forma gráfica bidimensional.

2.5.2 Análisis Cinemático

Se trata de determinar cómo se han desplazado las partículas de roca durante el proceso de deformación, desde su estadio inicial hasta el final, sin incluir los esfuerzos (Davies *et al.*, 2011). Existen diferentes estructuras que permiten determinar dicho desplazamiento y son denominadas indicadores cinemáticos dentro de los cuales se encuentran, estrías de falla, fracturas secundarias y la deflexión de las capas a lo largo de las fallas y en las zonas de cizalla (Fossen, 2010).

2.5.3 Análisis dinámico

En la mayoría de los casos, el análisis dinámico busca reconstruir la orientación y la magnitud del campo de esfuerzos mediante el estudio de un conjunto de estructuras como fallas y fracturas (Fossen, 2010).

2.6 Análisis de sistemas de fracturas

Los patrones de fracturas en rocas deformadas rara vez son aleatorios, sus orientaciones, tamaños y distribuciones espaciales a menudo muestran algún tipo de orden o dirección preferencial y de la misma forma pueden existir relaciones entre los diferentes atributos de fractura. Esto es importante porque la mecánica (por ejemplo, resistencia, anisotropía) y las propiedades de transporte (por ejemplo, fluidos, calor) de la roca dependen de estos atributos y patrones de fractura (Healy *et al.*, 2017).

Para realizar un análisis de sistemas de fracturas se tienen en cuenta aspectos como la densidad y la intensidad, además del tamaño de la fractura, la conectividad y permeabilidad, los cuales aportan información en términos de dinámica y zonas de acumulación de fluidos. Esto se puede observar a partir de software como FracPaQ, sin embargo, es importante hacer en primera instancia una correcta toma de datos estructurales (muestreo de fracturas en afloramiento) e interpretación de estos.

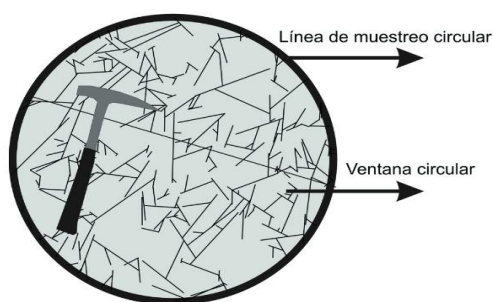
Para describir la cantidad de fracturas en una roca se cuentan con diferentes métodos de muestreo lineal o areal, siendo los más utilizados: (1) Muestreo de línea de exploración "Scanline Sampling" (2) Muestreo de ventana y (3) Método de líneas de muestreo y ventanas circulares "Estimator Circular" (Zeeb *et al.*, 2013).

2.6.1 Líneas de muestreo y ventanas circulares

Se trata de un método de muestreo para determinar abundancia de fracturas en dos dimensiones propuesto por Mauldon *et al.* (2001). Para ponerlo en práctica se debe dibujar un círculo sobre la superficie del afloramiento fracturado y posteriormente con la imagen digitalizada se procede a encontrar los parámetros mencionados anteriormente. La ventana circular (Figura 7) corresponde al área encerrada por la línea de muestreo circular que debe ser una representación significativa del afloramiento y por tanto de la zona (Moreno y García, 2006).

Figura 7

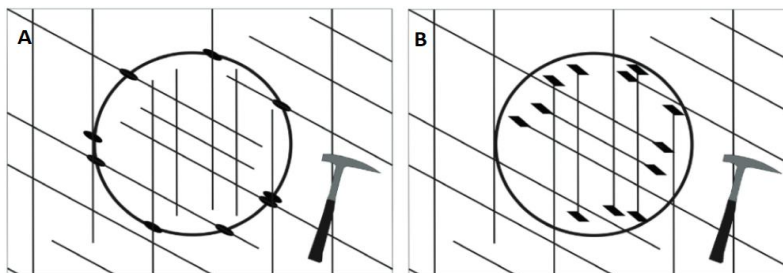
Línea de muestreo y ventana circular



Nota. Tomado de Moreno y García (2006).

Figura 8

Intensidad y densidad de fracturamiento



Nota. A) Intensidad de fracturamiento: intersecciones de la línea de muestreo con las trazas de fractura. B) Densidad de fractura: número de puntos terminales que caen dentro de la ventana circular. Tomado de Moreno y García (2006).

Además de los factores mencionados es importante tener en cuenta la longitud promedio de las fracturas para la cual se realiza una aproximación con la ventana de muestra, en la cual se consideran tanto las intersecciones de las fracturas con la circunferencia externa (n), como el número de puntos terminales que caen dentro de la misma (m) y el radio de circunferencia (r), como muestra la siguiente ecuación $\mu = (\pi r / 2) (n / m)$. (Moreno y García, 2006).

2.7 Análisis hidrodinámico de sistemas kársticos

Los acuíferos kársticos presentan características particulares que los diferencian de otros acuíferos, son reconocidos por su alta heterogeneidad que es ocasionada y organizada por la acción del flujo del agua subterránea, generando grandes vacíos, velocidades de flujo altas y altos caudales (Auzmendi, 1988). La heterogeneidad y la anisotropía hacen que los sistemas kársticos sean complejos de estudiar, dado que no es posible aplicar las leyes de Darcy, por lo tanto, se requiere entonces de la aplicación de métodos indirectos que permitan establecer el funcionamiento hidrodinámico del medio kárstico (Paiva & Cunha, 2020).

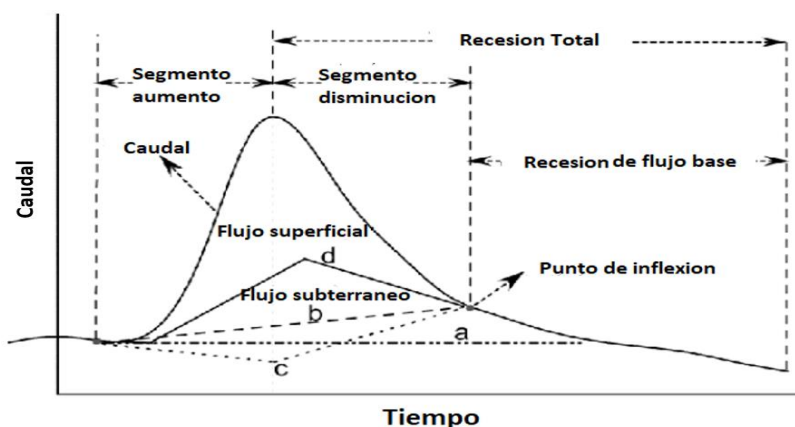
Los estudios hidrogeológicos desarrollados en sistemas kársticos se han fundamentado en el análisis de hidrogramas (Figura 9) como herramienta esencial para la comprensión del funcionamiento y estructura del medio kárstico (Pulido, 2014). La descarga de agua de un manantial kárstico representa una huella del funcionamiento hidrodinámico global del acuífero kárstico y de sus características físicas, siendo el análisis de los hidrogramas de los manantiales una herramienta preponderante para la comprensión de la hidrodinámica del sistema kárstico (Paiva & Cunha, 2020).

Un hidrograma es una representación gráfica de la tasa de escorrentía o caudal (m^3/s) en función del tiempo (día), obtenidos a partir de los datos registrados en estaciones de aforos (Rodríguez y Escalante, 2008). Se muestra la distribución temporal de la escorrentía en el punto

de medición o cálculo, reflejando las complejas características del flujo mediante una única curva, por medio de la cual se puede obtener la descarga, la velocidad u otras propiedades (USDA, 1989). Así mismo, el análisis de hidrogramas es empleado para separar y cuantificar los volúmenes de agua correspondientes a escorrentía superficial y escorrentía subterránea (Rodríguez y Escalante, 2008). Para la separación del flujo se utilizan los métodos de la línea recta, pendiente constante, flujo base fijo (Chow *et al.*, 1994) y el método de la curva de recesión (Pérez, 1969), (Figura 9).

Figura 9

Hidrograma



Nota. (a) Método de línea recta (b) Método de pendiente constante (c) Método de flujo base fijo d-Método de la curva de recesión. Tomado de Shengjia & Lu, 2016.

El karst es un sistema en el que es posible establecer con precisión la recarga o señal de entrada que está representada por la precipitación y la función de salida que está determinada por los caudales medibles en los manantiales (definido por la descarga). Por tanto, el sistema kárstico se puede asumir como un filtro que transforma retiene o elimina la señal de entrada a través de la creación de la señal de salida. El grado de transformación de la señal de entrada es valioso para entender la naturaleza del funcionamiento hidrodinámico del sistema (Ausmendi, 1988; Llanos y Garfias, 2006, Sağır *et al.*, 2019).

De acuerdo con el comportamiento hidrodinámico, los medios kársticos se dividen en dos grandes grupos. En primer lugar, se encuentra el sistema kárstico de conductos bien desarrollados y organizados, que se caracteriza por presentar un drenaje rápido después de un evento de lluvia. Por su alta transmisividad y baja capacidad de almacenamiento, estos acuíferos son conocidos como sistemas kársticos de flujo rápido, con un hidrograma que presenta una descarga máxima, por lo cual corresponden a la definición típica de acuíferos kársticos. Por otra parte, están los sistemas kársticos difusos que se caracterizan por presentar una red mal interconectada o poco desarrollada, en cuyo caso el agua tarda en viajar desde la recarga hasta la descarga. Estos acuíferos retienen agua por un período mucho más prolongado y en consecuencia tienen una gran capacidad de almacenamiento (Paiva & Cunha, 2020; Željka *et al.*, 2018).

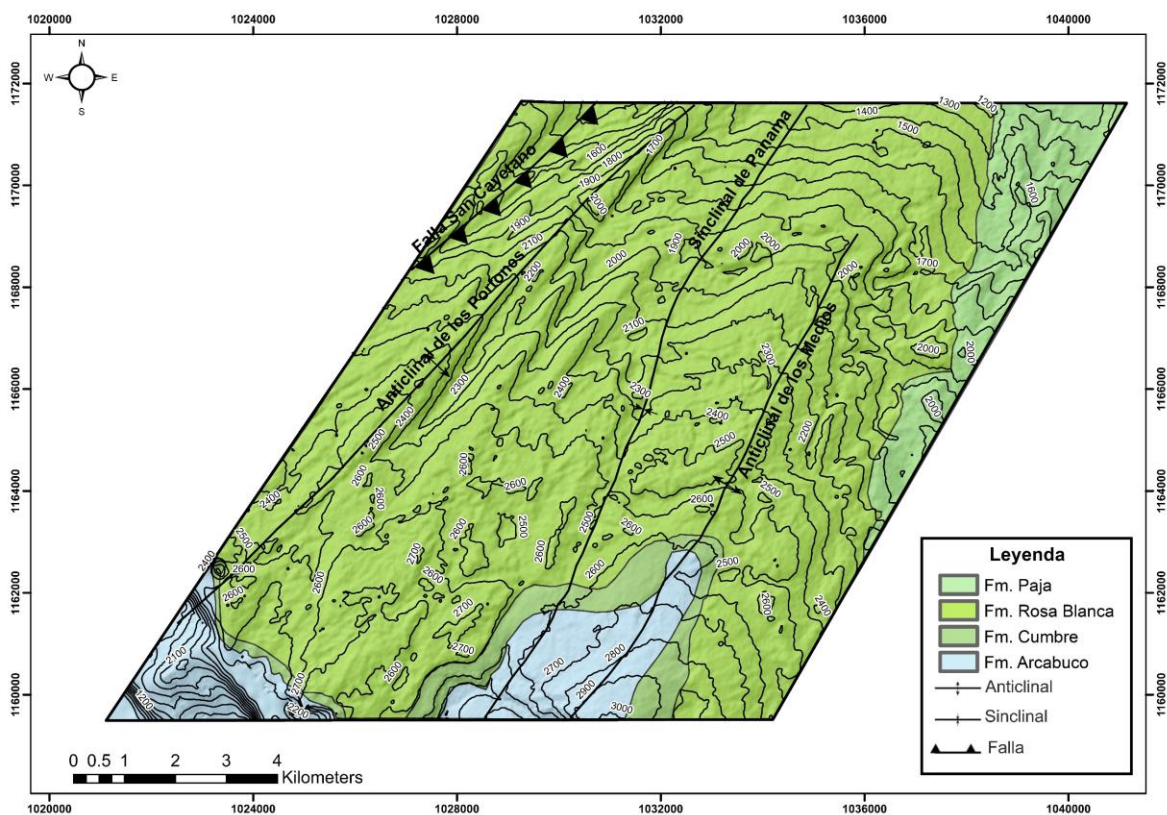
En los estudios hidrogeológicos desarrollados en los sistemas kársticos se emplean metodologías de análisis de series temporales, análisis de la curva de recesión y el análisis de las variaciones temporales fisicoquímicas e isotópicas del agua de manantial, los cuales pueden ser aplicados de forma combinada o individual (Bakalowicz, 2005; Paiva & Cunha, 2020).

3. Marco geológico

La región kárstica de El Peñón se encuentra localizada en el sector suroccidental de la Serranía de los Yariguíes que hace parte de la cordillera Oriental, la cual está afectada por estructuras regionales como los anticlinales de Portones y Los Medios, el sinclinal de Panamá y la Falla de San Cayetano (Figura 10).

Figura 10

Mapa Geológico



Nota. Geología tomada de Gómez et al. (2008).

La siguiente descripción geológica abarca las formaciones presentes en el área de estudio de la más antigua a la más reciente, no obstante, se hace énfasis en la Formación Rosa Blanca, unidad de interés para este proyecto de investigación, al ser la unidad que presenta karstificación.

-Formación Arcabuco (Kiar): Es la unidad más antigua aflorante en la zona de estudio, para la que han inferido una edad entre el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano. La unidad ha sido correlacionada con la Formación Los Santos aflorante en la Mesa de los Santos (Gómez *et al.*, 2008). Sus apariciones están restringidas al SW y NE del casco urbano del municipio de El Peñón, destacando que las mejores exposiciones de esta unidad se sitúan hacia el núcleo del Anticlinal de Los Medios. Se trata de una secuencia donde predominan las arenitas de cuarzo con

feldespátos, líticos e intraclastos, cuyos diferentes porcentajes las definen como líticas a lítico – feldespáticas, de grano fino, subredondeado y de color gris claro.

-Formación Cumbre (Kic): Esta formación aflora en el sector sur de la zona de estudio con un espesor local de 20 m medido en el sector de La Bodega, en el cruce entre las vías que conducen a Palo Blanco, La Hermosura y El Peñón, donde Gómez *et al.* (2008) realizan el levantamiento de una columna estratigráfica, dividiendo la formación en tres segmentos:

- **Segmento I:** Se trata de arenita de cuarzo, de grano muy fino, de color gris pálido, con glauconita, cemento calcáreo y estratificación interna de pequeña escala.
- **Segmento II:** Sobre un corto intervalo cubierto aparece un segmento formado por capas de arcillolitas amarillas intercaladas con capas delgadas de caolín, luego capas medias de arcillolitas de color gris oscuro, intercaladas con arcillolitas amarillas a negras con abundante contenido orgánico.
- **Segmento III:** Siguiendo con la secuencia se encuentran unas capas medias y delgadas de arcillolita gris clara con bioturbación, capas delgadas de caolín, intercaladas con una capa de arenita lítica de grano fino, de color negro, hacia el tope del segmento afloran arcillolitas color gris claro, con laminación plano-paralela, de geometría cuneiforme por una superficie erosiva en la base de una arenita superpuesta.

-Formación Rosa Blanca (Kir): La Formación Rosa Blanca es la unidad litoestratigráfica de mayor extensión en la zona de estudio y a la que se asocian los procesos de karstificación evidenciados por las distintas geoformas típicas de estos ambientes. Según Julivert (1968), la Formación Rosa Blanca, es oblicua respecto a las líneas isócronas; su edad sería Barremiano hacia el extremo norte del Valle Medio del Magdalena, Hauteriviano en la región de la Mesa de Los Santos y San Gil, y Valanginiano en Villa de Leiva. En el núcleo del anticlinal de Los Medios

donde aflora la unidad, en un escarpe de 150 m Gómez *et al.* (2008) identifican tres segmentos que se describen a continuación:

- **Segmento I:** Conformado hacia la base por una secuencia de capas gruesas de lodolitas calcáreas color gris oscuro, grano soportadas, intercaladas con láminas de arcillolita color gris oscuro y calizas. Las capas presentan una geometría de tipo ondulada irregular paralela. Seguidamente aparece una secuencia de lodolitas calcáreas, color gris oscuro, en capas muy gruesas hasta de 6 m de espesor, intercaladas con arcillolitas color gris oscuro y bajo contenido de bivalvos.
- **Segmento II:** Se trata de una secuencia de capas gruesas de lodolitas y limolitas calcáreas, masivas, color gris oscuro, intercaladas con láminas de arcillolita color gris oscuro.
- **Segmento III:** Corresponde a capas gruesas a muy gruesas de lodolitas calcáreas color gris oscuro, con espesores variables intercaladas con algunos estratos delgados a muy gruesos de caliza (biomicrosparita), arenitas de cuarzo y de arcillolita color gris oscuro. Las capas presentan una geometría de tipo plano paralela a ondulosa.

-Formación Paja (Kip): Es la unidad más joven aflorante en la zona de estudio, su edad data del cretácico temprano. Se compone de capas finas a medias de lodolitas calcáreas (mudstones y wackestones) intercaladas con arenitas de cuarzo, calcáreas, con algunas trazas de bioturbación, abundantes concreciones silíceas y calcáreas, fósiles de amonitas y laminación plana paralela (Gómez *et al.*, 2008). Su exposición se limita al NE de la zona de trabajo.

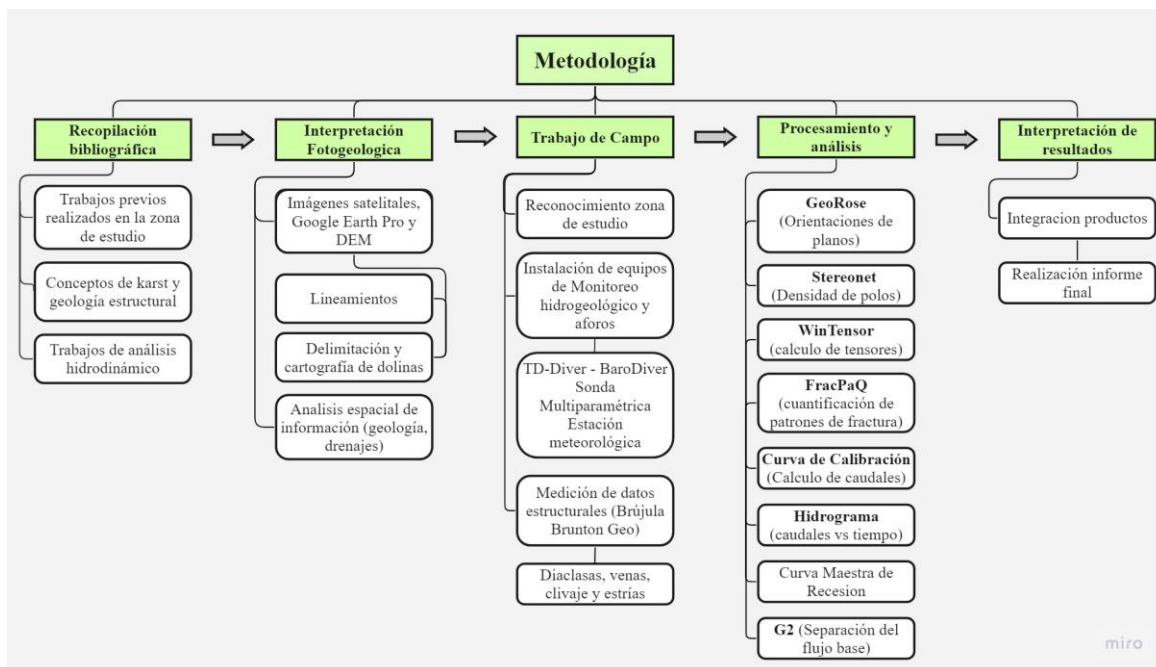
4. Metodología

La metodología empleada para el desarrollo de este trabajo de investigación consiste en cinco fases mostradas en la Figura 11, en las cuales se realizó una revisión y recopilación

bibliográfica, interpretación de fotogeológica y trabajo de campo. Con la información obtenida en las tres primeras fases se efectuó la interpretación, análisis y discusión de los resultados, que se presentan en este informe.

Figura 11

Esquema metodológico



4.1 Recopilación bibliográfica

En la primera fase, se realizó la recopilación y revisión de la bibliografía disponible de la zona de estudio. En la revisión se incluyen artículos de carácter académico, mapas geológicos, mapas topográficos, memorias explicativas de dichos mapas, modelos digitales de elevación e imágenes satelitales. En esta etapa se desarrolló una base de datos en un sistema de información geográfica para integrar la información obtenida de los trabajos revisados, a partir de la cual se realizó un diagnóstico de la geología de la zona de interés, lo que permitió identificar los objetivos, limitaciones y problemas a resolver, que hacen necesario la realización de este estudio.

4.2 Interpretación Fotogeológica

La información inicial se extrajo de imágenes satelitales y modelos digitales del terreno, los cuales se integraron por medio de una Geodatabase. Los modelos digitales del terreno DEM se descargaron del ASF Data Search <https://search.asf.alaska.edu> que es una página web gratuita y de acceso libre perteneciente a la NASA. El DEM fue obtenido del dataset ALOS PALSAR por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial a partir del satélite ALOS con una resolución espacial de 30 m.

Por otra parte, se realizó la cartografía de depresiones cerradas (dolinas) por medio de la identificación de láminas de agua, en el caso de las depresiones no inundadas se realizó su interpretación con base en secciones transversales y en la variación topográfica que permitieron delimitarlas a partir de imágenes satelitales de la base de Google Earth pro.

Teniendo estos insumos se procedió a realizar la integración de la información en un SIG con el fin de identificar lineamientos y geoformas. De esta fase se obtuvo la cartografía de dolinas que es un indicador del control estructural de la zona. En adición, se identificaron las principales estructuras regionales y lineamientos de la zona de interés. Cabe mencionar que los mapas elaborados en este proyecto de investigación se utilizó el sistema de coordenadas proyectado MAGNA Colombia Bogotá.

Para la identificación de los lineamientos regionales y locales se siguió la metodología propuesta por Mabee *et al.*, (1994), la cual consistió en comparar las interpretaciones de los lineamientos de los autores y director del trabajo de grado y conservar los trazos coincidentes.

4.3 Trabajo de Campo

En esta etapa se realizaron cinco campañas en un total de 25 días que permitieron recolectar los datos necesarios para cumplir los objetivos planteados en este proyecto. Inicialmente, se

desarrolló una salida de reconocimiento de cuatro días con el propósito de definir una ruta de trabajo por medio de la cual se establecieron estaciones de control estructural y de monitoreo hidrogeológico para la toma de datos en posteriores salidas de campo.

Posteriormente, se llevaron a cabo dos salidas de campo en las cuales se cubrió la zona de interés para observar el comportamiento litológico y estructural de la zona. En esta etapa se realizó la visita de los afloramientos para realizar la toma de datos estructurales (planos de diaclasas, venas, clivaje) y litológicos. Además, se tomó evidencia fotográfica para su posterior análisis por el método de ventana de muestreo de FracPaQ, la selección de los afloramientos se realizó teniendo en cuenta su distribución espacial y que presentaran bajo grado de meteorización. En la segunda salida de campo se reconocieron los principales afloramientos de agua y se seleccionó la corriente saliente de la cueva Las Sardinas, para la instalación del equipo de monitoreo que recolectó los datos necesarios para el análisis hidrodinámico del medio. El equipo instalado el 18 de septiembre del año 2022 corresponde a un transductor de presión absoluta y un transductor de presión atmosférica, marca TD-Diver y Baro-Diver.

Durante las campañas de campo se realizaron tres aforos para observar la variación temporal de los caudales en el sitio donde se instaló el equipo. De la misma forma, se hicieron otros aforos, en la cuarta salida de campo, en diferentes puntos dentro de la misma cuenca hidrográfica de la cueva Las Sardinas para ver la variación espacial de los caudales. Los aforos se realizaron utilizando el método de vadeo, el cual consiste en calcular el caudal que pasa en un área transversal del cauce en un tiempo definido. Para esto el área transversal se divide en diferentes secciones y se toma la velocidad del flujo en cada una de ellas, mediante un instrumento de medida, que, para este caso, fue un medidor magnético de marca Hach modelo FH950. Posteriormente se

multiplica la velocidad por el área para calcular el caudal de cada sección y se suman para así obtener el caudal total.

Por otra parte, en diferentes puntos a lo largo del área de estudio, se midieron las propiedades fisicoquímicas del agua subterránea por medio de una sonda multiparamétrica marca Hanna Instruments HI 98195.

4.3.1 Medición de datos estructurales

4.3.1.1 Diaclasas. Para la toma sistemática de datos de diaclasas se agruparon por familias para la hacer las respectivas mediciones utilizando la brújula Brunton Geo. En los planos se midió rumbo, buzamiento y se hicieron observaciones de las características de estas fracturas.

4.3.1.2 Indicadores cinemáticos. En los planos estriados encontrados en los afloramientos, además de medir el rumbo y buzamiento, se registró el pitch que corresponde al ángulo formado entre la línea y el rumbo de la estría, también se determinó el sentido en que está inclinada respecto al rumbo. Teniendo los datos se determina el desplazamiento relativo de los bloques involucrados. Se tuvieron en cuenta también las venas y otros tipos de fractura para determinar el sentido de la cizalla en los casos que se observaran.

4.3.1.3 Clivaje y venas. Para la toma de datos de clivaje y venas se midió en los planos el rumbo y el buzamiento, a lo largo del afloramiento con el fin de observar si existía alguna variación de los datos.

4.4 Interpretación y análisis de datos

4.4.1 GeoRose

Por medio de este software se validaron los datos medidos en campo de los planos de diaclasas, venas, clivaje y estratificación. A partir del procesamiento de los datos ingresados se generaron los diagramas rosas que permiten observar las variaciones de la orientación de los

sistemas de fracturas analizados, por medio del cual se pudo determinar las orientaciones preferenciales de los patrones de fractura de la zona de estudio.

4.4.2 WinTensor

A partir de los datos tomados en campo de fracturas (incluyendo el tipo) y planos de falla se cargaron al software y se procedió con el procesamiento supervisado de datos, obteniendo así el tensor de esfuerzos del área de trabajo junto con otros outputs como el régimen de esfuerzos y círculo de Mohr. El programa presenta dos métodos de procesamiento diedros rectos y de rotación optimizada. El primer método es un método gráfico que permite establecer la dirección de los esfuerzos principales basado en las orientaciones de los planos y el sentido del movimiento generando cuadrantes de tensión y compresión en la proyección estereográfica de Schmidt. El método de rotación optimizada parte del tensor obtenido por el anterior método, en él se generan una serie de soluciones mediante rotaciones sucesivas alrededor de los tres ejes de esfuerzo (Delvaux & Sperner, 2003).

4.4.3 Stereonet

A partir del procesamiento de los datos medidos en campo de diaclasas, clivaje, venas y estratificación en este software se generaron los diagramas de densidad de polos, que permite determinar la inclinación de los planos.

4.4.4 FracPaQ

FracPaQ es una caja de herramientas de código abierto escrita en MATLAB™ y disponible públicamente en GitHub y Mathworks FileExchange. Está diseñado para cuantificar patrones de fractura en roca a diferentes escalas. A partir de cualquier tipo de entrada, el código calcula las longitudes de fractura, los ángulos y la conectividad. Estos se muestran como mapas y gráficos. Los estimados de intensidad y densidad de fractura en 2D se hacen utilizando un modelo de placa

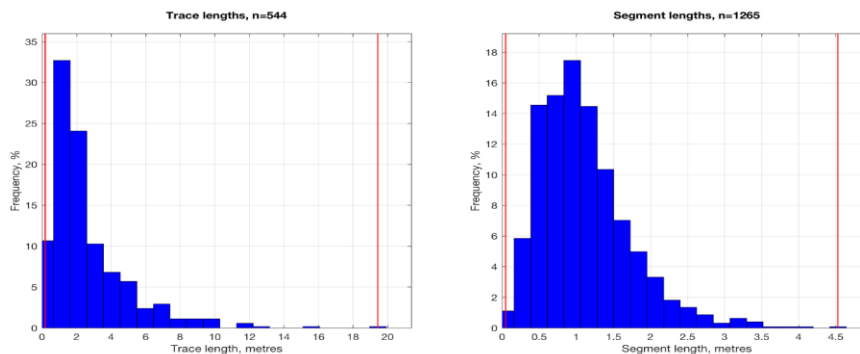
paralela simple y asumiendo una apertura constante (Healy *et al.*, 2017). Durante las salidas de campo se realizó el registro fotográfico para su digitalización en Corel Draw y procesamiento en FracPaQ de los afloramientos de campo.

Una vez procesados los datos se analizaron los outputs que ofrece el programa, los cuales se muestran a continuación:

Histogramas de longitud: representación de las frecuencias para longitud de trazas y frecuencias para longitudes de segmentos (Figura 12), teniendo en cuenta que la longitud de traza es igual a la suma de las longitudes de los segmentos que la componen (líneas rectas).

Figura 12

Frecuencias de la longitud de trazas y Frecuencias de la longitud de segmentos



Nota. En la figura de la izquierda se observa el histograma de frecuencias para la longitud de trazas y la derecha para la longitud de segmentos. Tomado de Healy et al. (2017).

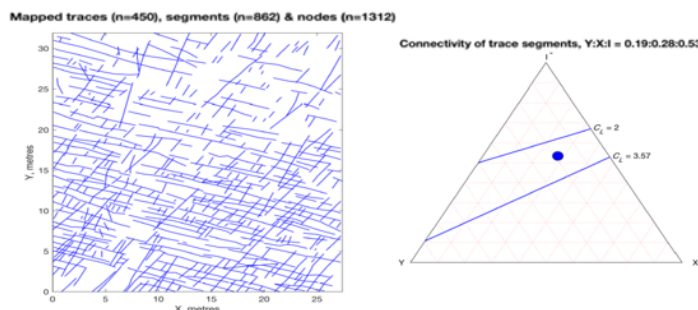
Diagramas rosas: muestra las orientaciones de fracturas de los afloramientos seleccionados y son útiles para identificar direcciones preferenciales de las fracturas y posibles direcciones de flujo. Por medio de esta herramienta también se obtuvieron los diagramas rosas de las orientaciones preferenciales de los ejes de pliegue, ejes mayores de dolinas, lineamientos y drenajes, utilizados para el análisis estructural de la zona.

Mapas de intensidad, densidad y círculos de exploración: las estimaciones de intensidad y densidad se realizan en un patrón de cuadrícula regular utilizando el número de círculos de escaneo especificados por el usuario. El código dibuja círculos de exploración en las direcciones X- Y y cuenta las intersecciones de segmentos de fractura con el perímetro del círculo (n) y el número de segmentos que terminan dentro del círculo (m). En este trabajo solo se incluyen los valores cuantitativos de estos dos parámetros.

Mapas de patrones de fractura: muestran los patrones de fracturamiento de la zona, permiten empezar a evaluar posibles direcciones de flujo a partir de la conectividad. El mapa de patrones de fractura se complementa con el diagrama ternario de Manzocchi, que es un gráfico en el cual se pueden observar cuales son las redes de fracturamiento más conectadas (Figura 13).

Figura 13

Mapa Patrón fracturas y diagrama ternario de conectividad



Nota. Mapa de patrones de fractura a la izquierda y diagrama ternario de conectividad de segmentos de fractura. Tomado de Healy et al. (2017).

4.4.5 Curva de calibración de caudales

La curva de calibración de caudales o también denominada curva de descarga es la representación gráfica de las variaciones de la descarga o caudal en función de la lectura de los niveles. Su elaboración es relativamente sencilla para niveles en el que se tenga registrado una suficiente cantidad de aforos (caudales medidos) (Pérez ,1969). Por medio de esta curva se

obtienen los hidrogramas o gráficas de variaciones del caudal contra el tiempo en una sección determinada (Vélez, 1999).

En tal sentido, se requirió la realización de tres aforos durante un periodo de tiempo para registrar caudales máximos que fueron obtenidos en los meses de septiembre y noviembre de 2022 y caudales mínimos en el mes de enero de 2023. Posteriormente, en Excel se graficaron los caudales obtenidos en los aforos en función de los niveles registrados para el momento en que se hicieron los mismos, los niveles se obtuvieron restando las presiones hidrostática y atmosférica, medidas por el TD-Diver y Baro-Diver en una serie de tiempo cada 10 minutos. Luego, se revisó cuál de las ecuaciones de las líneas de tendencia se ajustaban mejor a los datos, en este caso se seleccionó la línea de tendencia polinómica por ser con la que se obtuvo el mejor ajuste identificado mediante el coeficiente de determinación (R^2).

4.4.6 Obtención del hidrograma

Teniendo la ecuación de la curva de calibración que representa los caudales en función de los niveles, se calcularon los caudales con los valores de los niveles registrados por el TD-Diver desde el 18 de septiembre de 2022 (día que fue instalado el equipo) hasta el 23 de enero de 2023 (día que fueron descargados los datos por última vez). Posteriormente, se realizó la gráfica de los caudales resultantes en función del tiempo agregando una serie con la precipitación en el mismo intervalo de tiempo para analizar la relación entre los eventos de precipitación y la respuesta del sistema kárstico ante ellos. A partir de la estación meteorológica de El Peñón se obtuvieron datos de precipitación, cada media hora, desde el 10 de noviembre del año 2022 hasta el 23 de enero de 2023. Los datos anteriores al 10 de noviembre no se pudieron recuperar debido a fallas en la estación, por lo cual, se hizo necesario emplear los datos de la estación meteorológica del IDEAM más cercana a la zona la cual se encuentra ubicada en el municipio de Bolívar a unos 13 km al SE

aproximadamente. Se hace un análisis con los valores de precipitación diarios de la estación de Bolívar desde el momento de instalación del equipo hasta la fecha de realización del tercer aforo y otro análisis para los datos de la estación de El Peñón desde que se tiene registro hasta la realización del tercer aforo.

4.4.7 Curva maestra de recesión

La curva maestra de recesión se construyó con las recesiones identificadas en el análisis de épocas de no lluvia del hidrograma. Se grafican en escala logarítmica cada uno de los tramos de las recesiones, finalmente se obtiene la línea de tendencia lineal, cuya pendiente de la recta corresponde a la constante de recesión.

4.4.8 Separación del flujo base (G2).

La separación de la fracción del flujo base se puede realizar por medio de métodos gráficos, químicos e implementando algoritmos (Gómez y Gómez, 2012). Para este trabajo se utilizó el método gráfico de la línea recta y se emplearon los algoritmos de 1 parámetro, 2 parámetros y Nathan y McMahon Paso 1, que fueron obtenidos utilizando el software G2 desarrollado por Gómez y Gómez (2012).

4.5 Interpretación de resultados

Posterior al procesamiento de los datos se procedió a analizar e integrar los resultados obtenidos en este proyecto de investigación que conforman el presente informe.

5. Resultados

A continuación, se muestran los resultados del análisis estructural e hidrodinámico del sistema kárstico El Peñón.

5.1 Geología Estructural

La región kárstica de El Peñón se desarrolla sobre una secuencia cretácica afectada por pliegues regionales como la falla de San Cayetano, el anticlinal Los Portones (que es la estructura más occidental), sinclinal de Panamá y el anticlinal de los Medios y estructuras menores (sinclinal Las Sardinias, anticlinal Los Carracos, sinclinal Aguas Blancas, anticlinal Escuillas, sinclinal de San Pedro y anticlinal El Peñón) que se encuentran entre el anticlinal de los Portones y el sinclinal de Panamá (Figura 13), cabe mencionar que estas estructuras fueron nombradas por los autores de acuerdo con su cercanía con centros poblados y a cavidades kársticas.

Figura 14

Mapa geológico con estructuras

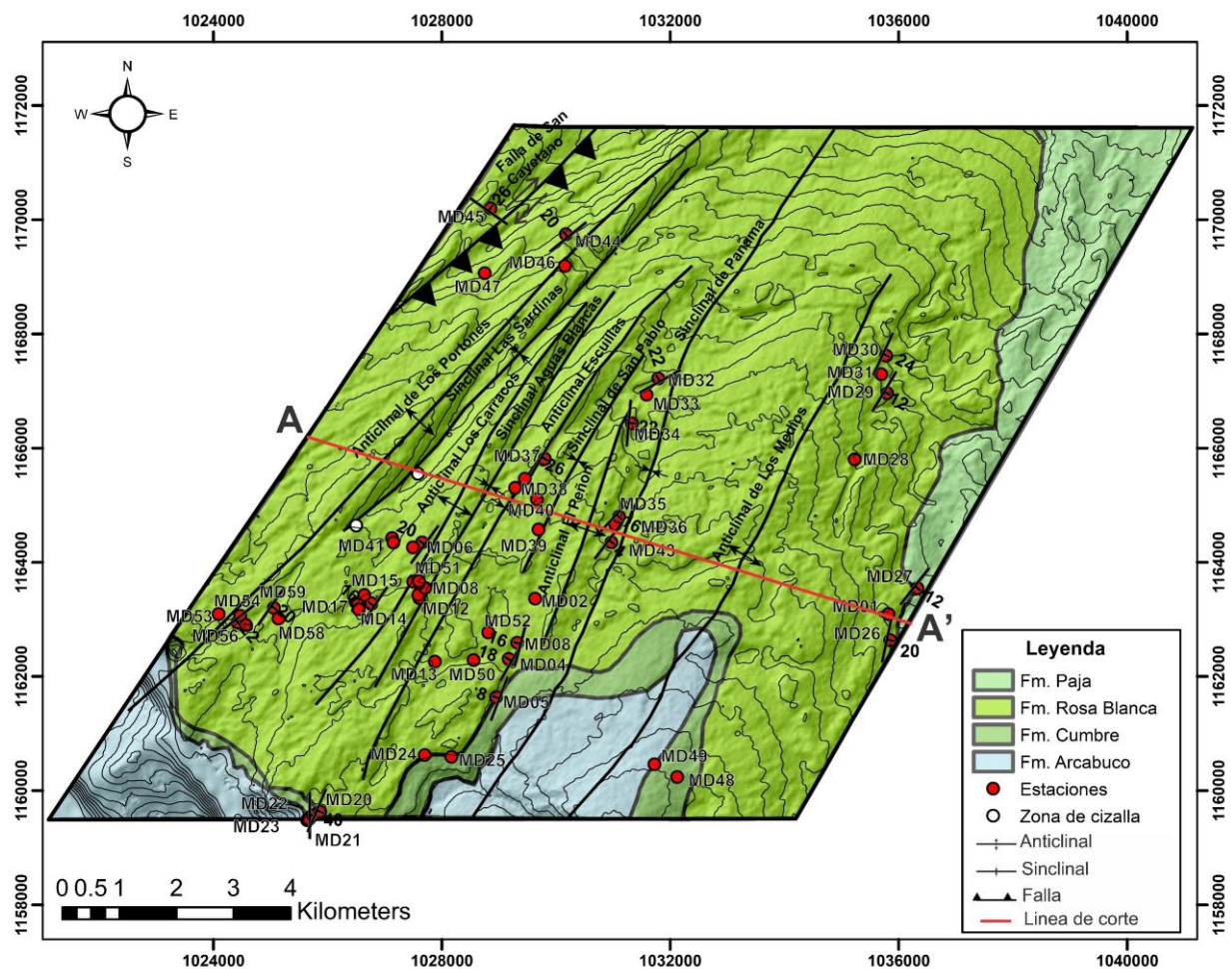
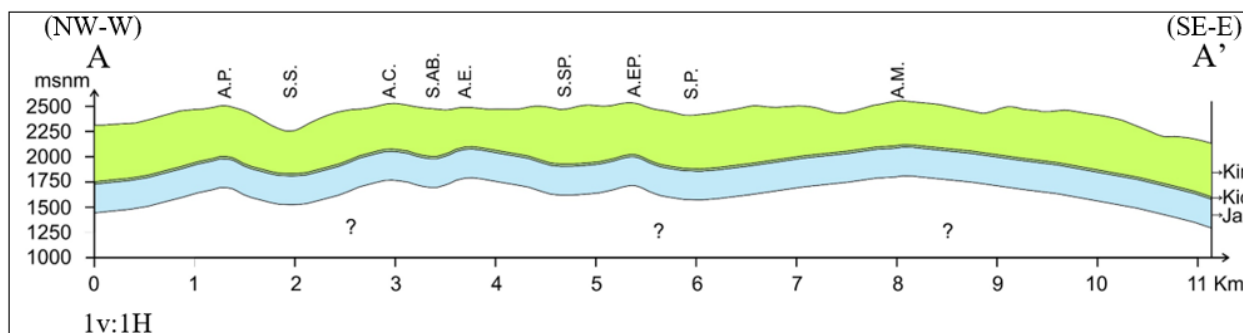


Figura 15*Corte geológico*

Nota. Se listan las estructuras mencionadas en el corte geológico: Anticlinal de Portones (A. P), Sinclinal las Sardinias (S. S), Anticlinal los Carracos (A.C), Sinclinal Aguas Blancas (S. AB), Anticlinal Escuillas, Sinclinal de San Pablo (S.SP), Anticlinal El Peñón (A.EP), Sinclinal de Panamá (S.P), Anticlinal de Los Medios (A.M).

A continuación, se hará una breve descripción de las estructuras regionales y menores que se hacen parte de la zona de estudio.

Falla de San Cayetano: se trata de una estructura de rumbo N30E. En la zona de trabajo no se encontraron indicadores que permitiesen establecer la cinemática de la falla, sin embargo, por la expresión geomorfológica se asume como falla oblicua, con componente inversa en el buzamiento y dextral en el rumbo.

Anticlinal de Los Portones: se encuentra ubicado al occidente del área de estudio, presenta un rumbo N30°E. Se trata de un pliegue suave con un plano un axial vertical. El anticlinal se encuentra afectado en su flanco occidental por la Falla de San Cayetano.

Anticlinal de Los Medios: es una de las principales estructuras del área de estudio, se encuentra ubicado en la parte sur y central de la plancha 150 (Gómez *et al.*, 2008), comparte la

tendencia general de las demás estructuras de la zona (N40E). El anticlinal de los Medios según la apertura de sus flancos es un pliegue suave y tiene un plano axial vertical.

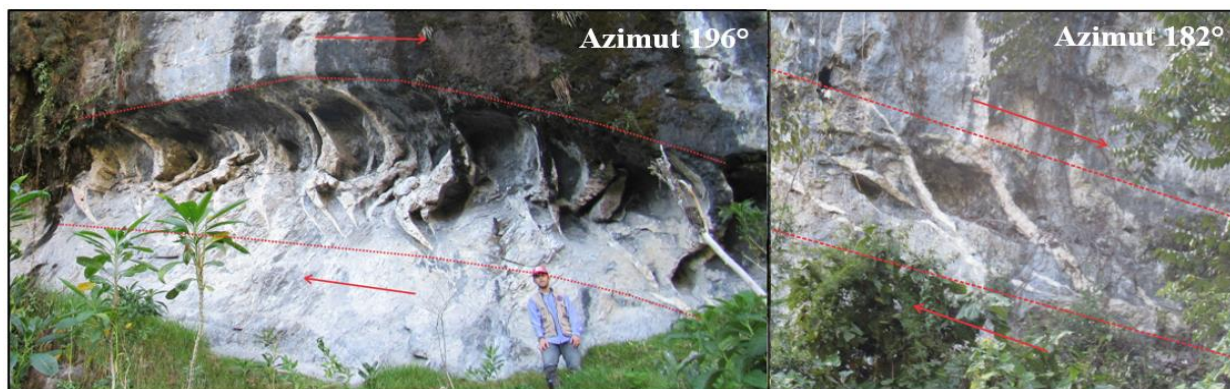
Sinclinal de Panamá: está estructura se encuentra ubicada en medio de los anticlinales Portones y Los Medios, comparte con ellos la orientación N30E. Se trata de una estructura suave con un plano axial vertical.

Las estructuras menores presentan la misma orientación preferencial con dirección N30E-N40E de las estructuras regionales mencionadas. Según la apertura de sus flancos se tratan de estructuras suaves.

En el flanco oriental del sinclinal de Las Sardinias se encuentra dos zonas de cizalla (Figura 15) representadas por venas sigmoidales de calcita en forma de z. Las venas poseen una longitud promedio de 2 m y muestran una cizalla con desplazamiento dextral (Figura 16).

Figura 16

Venas sigmoidales de calcita en forma de z



Nota. Zona de cizalla con venas de calcita en forma de Z, deslizamiento dextral.

Las rocas de la Formación Rosa Blanca como se ha mencionado exhiben una foliación secundaria denominada clivaje (Figura 17) o también nombrado por Mantilla *et al.*, 2003 como slaty cleavaje, el cual consiste en planos penetrativos repetitivos que están dispuestos a modo

perpendicular con respecto a los planos de estratificación. En los afloramientos visitados se logró evidenciar directamente flujo de agua por medio de estas discontinuidades.

Figura 17

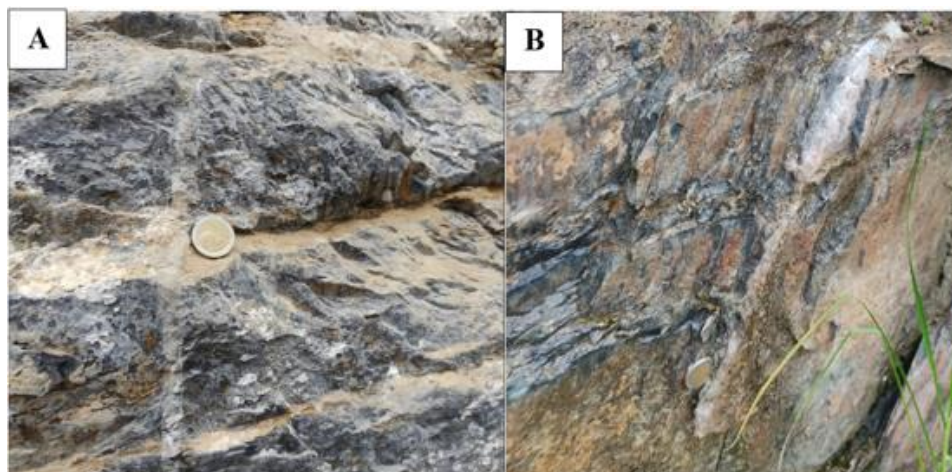
Clivaje



También se pudo apreciar la presencia de venas de calcita subparalelas que cortan las capas de calizas y lodolitas (Figura 18A) que componen la Formación Rosa Blanca y venas que son paralelas a los planos de clivaje (Figura 18B). El espesor de las venas varía entre 1 y 50 mm con un valor promedio de 9,28 mm.

Figura 18

Venas



Nota. A) Vena de calcita de 5mm de espesor cortando una capa de lodolita. B) Vena de calcita de 3 mm de espesor paralela plano de clivaje.

En la zona de estudio, se observó la presencia de pliegues por gravedad (Figura 19) que se presentan en las lodolitas calcáreas de la Formación Rosa Blanca, originados además por la inclinación vertical de los planos de clivaje sumado a la presión litostática, con lo cual se genera deslizamiento entre los planos.

Figura 19

Pliegues de gravedad en los planos de clivaje



5.1.1 Lineamientos

5.1.1.1 Interpretación regional de lineamientos.

A partir del modelo digital de terreno se realizó el trazo de los lineamientos (Figura 20) presentes en la zona de estudio y sus alrededores. Esta interpretación se realizó para determinar si existe una relación entre las orientaciones de los lineamientos a escala regional y local (zona de estudio). Tras su procesamiento y análisis de la orientación se encuentra una tendencia

predominante NE-SW entre los 40° y 60° y una tendencia secundaria SE-NW entre 120° - 140° (Figura 21).

Figura 20

Interpretación de los lineamientos regionales

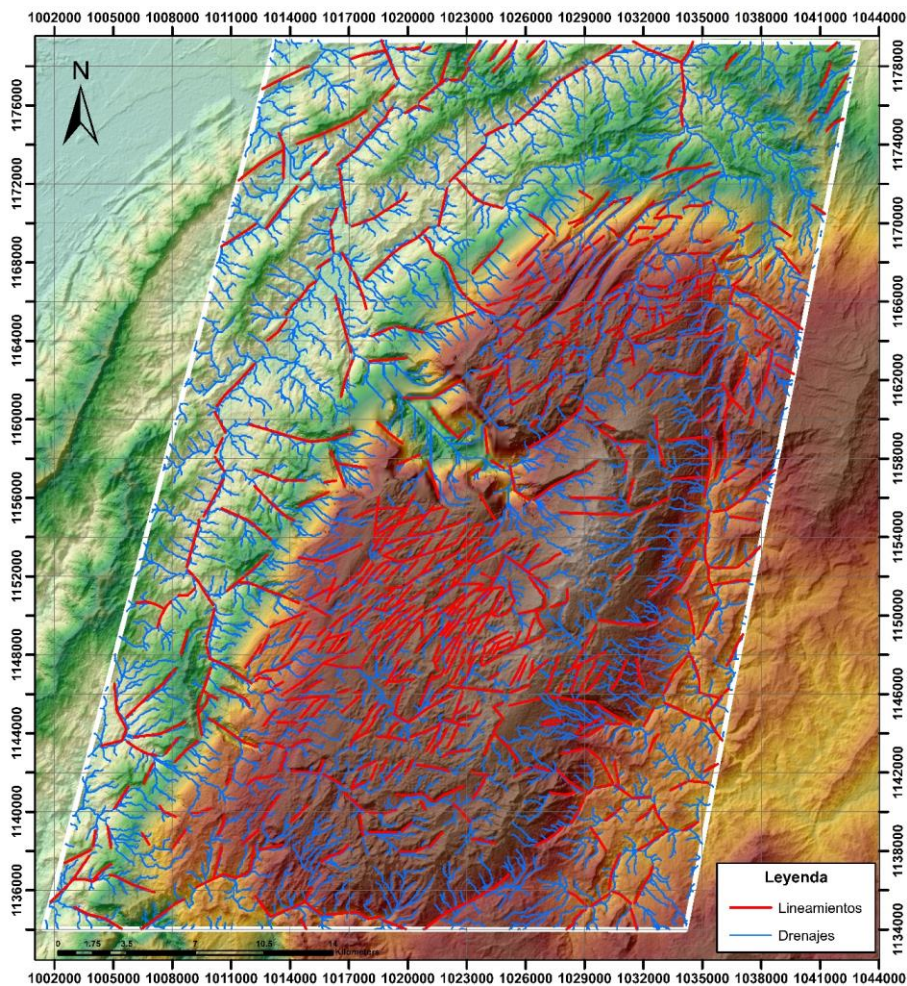
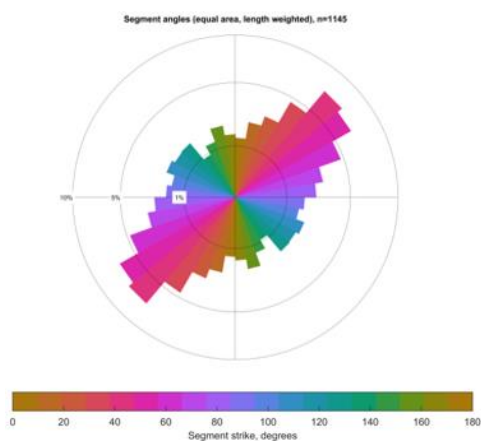


Figura 21

Diagrama rosa de los lineamientos regionales



5.1.1.2 Interpretación de los lineamientos en la zona de estudio

En el área de trabajo se realizó la interpretación y análisis de los lineamientos (Figura 22), obteniendo una tendencia preferencial entre los 40° y 60° y una secundaria entre 120° y 130° (Figura 23), coincidiendo con la orientación de los lineamientos regionales.

Figura 22

Interpretación lineamientos de la zona de trabajo

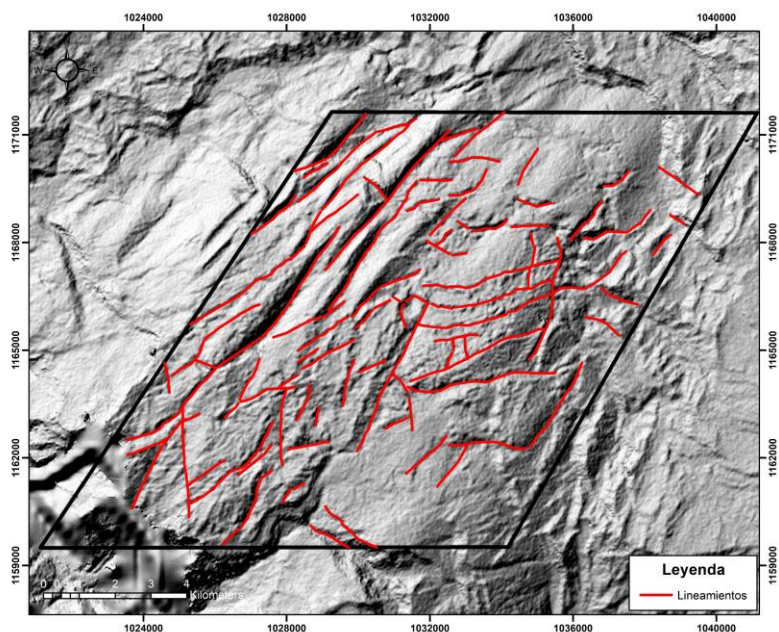
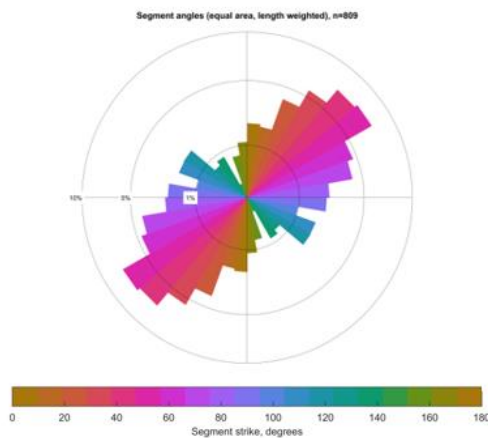


Figura 23

Diagrama rosa de los lineamientos de la zona de estudio

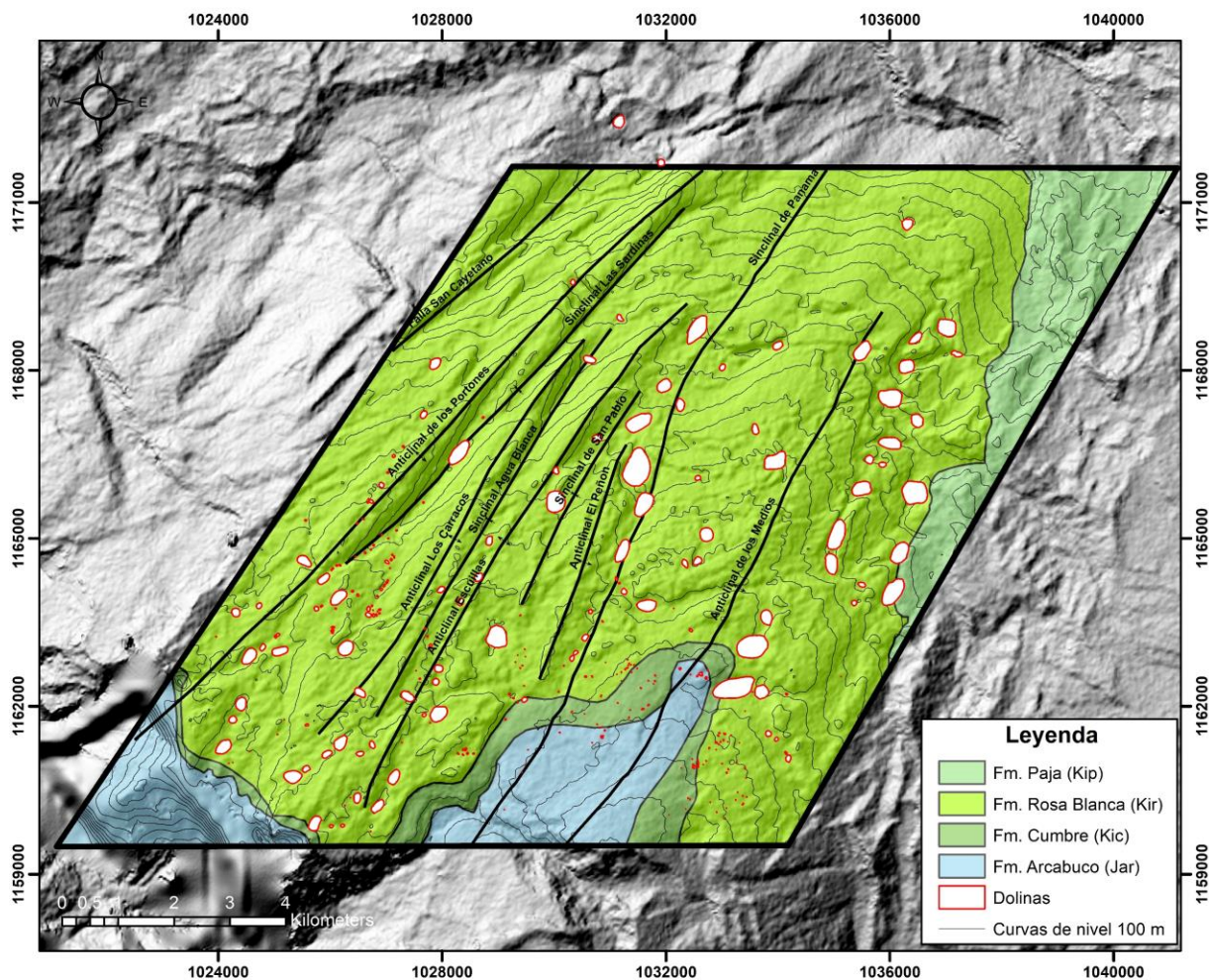


5.1.2 Análisis morfométrico de las depresiones cerradas

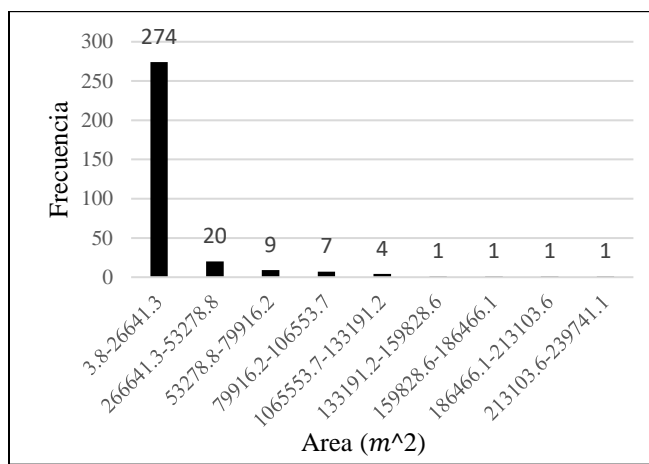
En el área de estudio se identificaron 320 depresiones cerradas (dolinas y úvalas) (Figura 24) que suman un área total de $3,9 \text{ km}^2$ en una superficie de $143,1 \text{ km}^2$ correspondiente a la zona de estudio. La Formación Rosa Blanca en el área de estudio presenta una cobertura de $118,8 \text{ km}^2$. Así mismo, se evidencia un desarrollo de depresiones de menor tamaño a lo largo de la Formación Cumbre que presenta una extensión de 6 km^2 , tomando como base la superficie sumada entre ambas unidades de $124,8 \text{ km}^2$ se calcula una densidad de depresiones de $2,5 \text{ depresiones/km}^2$.

Figura 24

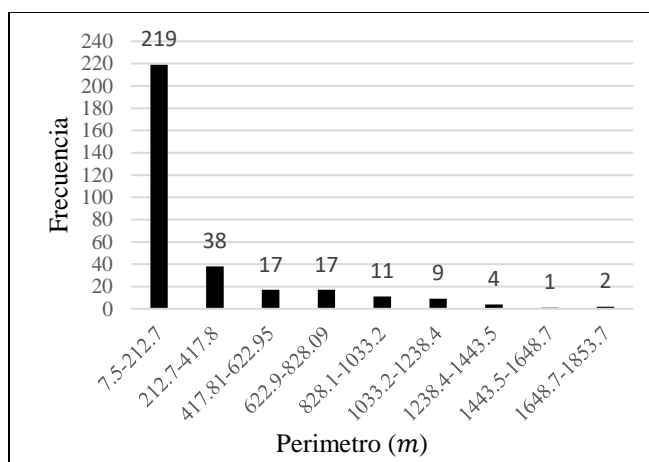
Mapa de depresiones cerradas de la zona de trabajo



5.1.2.1 Área. El área de las depresiones oscila entre $3,8 \text{ m}^2$ y 239741 m^2 con una media de 12208 m^2 , los resultados muestran una distribución de asimetría positiva teniendo una mayor cantidad de dolinas de menor área (Figura 25).

Figura 25*Histograma de área*

5.2.1.2 Perímetro. El perímetro de las depresiones cerradas varía entre 7,5 m y 1854 m con una media de 244 m. Los resultados reflejan una distribución estadística del perímetro de forma asimétrica positiva. (Figura 26).

Figura 26*Histograma de perímetro*

5.1.2.3 Longitud. La longitud se obtuvo a partir de la medición de los ejes mayores y menores de las depresiones cerradas. La frecuencia de los ejes mayores presenta una distribución asimétrica positiva, con valores que oscilan entre 2,3 m y 778 m y una media de 158,3 m (Figura

27). Por otra parte, los ejes menores de las depresiones varían entre 1,8 y 462 m con una media de 59,8 m, la distribución al igual que en la longitud del eje mayor presenta una distribución asimétrica positiva (Figura 28).

Figura 27

Histograma de longitud del eje mayor

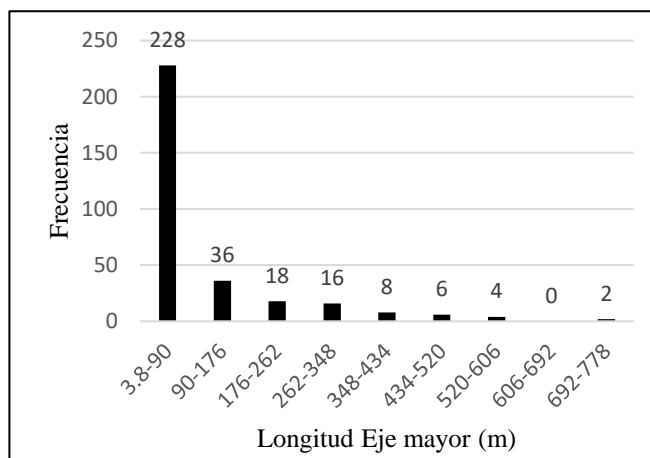
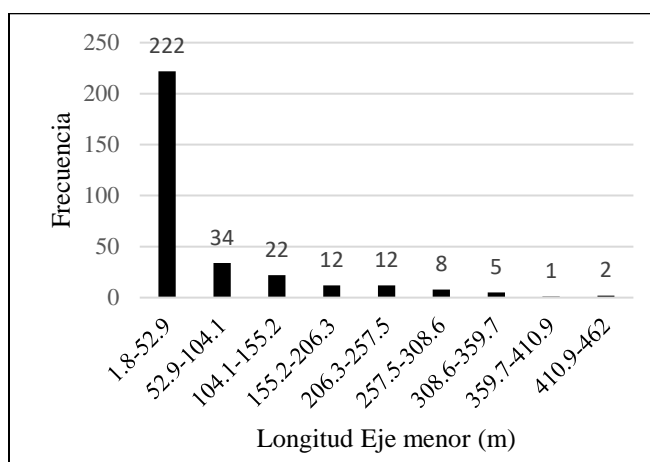


Figura 28

Histograma de la longitud del eje menor



5.1.2.4 Relación de alargamiento. De acuerdo con la clasificación propuesta por Basso *et al.* (2013) (Tabla 2) basada en la relación R de las longitudes de los ejes mayor y menor de las

depresiones cerradas. Los valores obtenidos de la relación de alargamiento varían entre 0,8 y 4,9 y una media de 1,6.

Tabla 2

Clasificación de dolinas de acuerdo con relación de alargamiento de los ejes

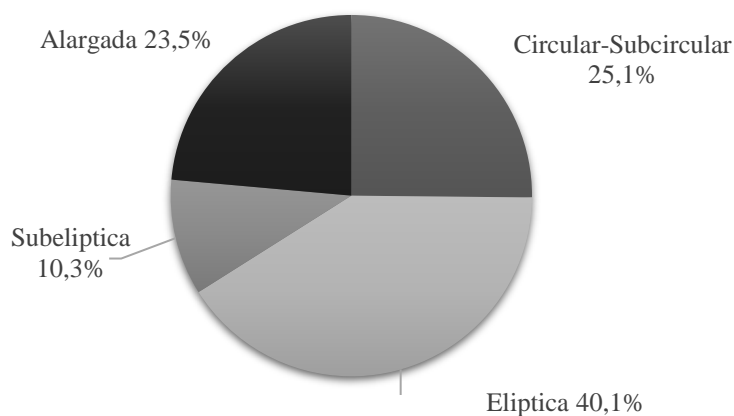
Rangos	Clasificación
$R \leq 1,21$	Circular-Subcircular
$1,21 < R \leq 1,65$	Elíptica
$1,65 < R \leq 1,8$	Subelíptica
$R > 1,8$	Alargada

Nota. Tomado de Basso et al. (2013).

Según los resultados obtenidos (Figura 29) se tiene una mayor frecuencia de depresiones elípticas y alargada que reflejan un control estructural evidente, puesto que estas formas tienden a presentarse cuando existen orientaciones preferenciales de las fracturas que favorecen su desarrollo de acuerdo con Basso *et al.* (2013).

Figura 29

Clasificación de forma de las depresiones cerradas de la zona de estudio



La estadística de los parámetros morfométricos obtenidos se muestra resumidos en la tabla 3 donde se puede apreciar los valores mínimos, máximos y promedio de las variables analizadas para las depresiones cerradas.

Tabla 3

Resumen de parámetros morfométricos

	Área (m ²)	Perímetro (m)	Longitud eje mayor (m)	Longitud eje menor (m)	Relación de alargamiento
Media	12208,1	244,0	158,3	59,8	1,6
Valor máximo	239741,1	1853,8	777	462	4,9
Valor mínimo	3,8	7,5	2,3	1,8	0,8

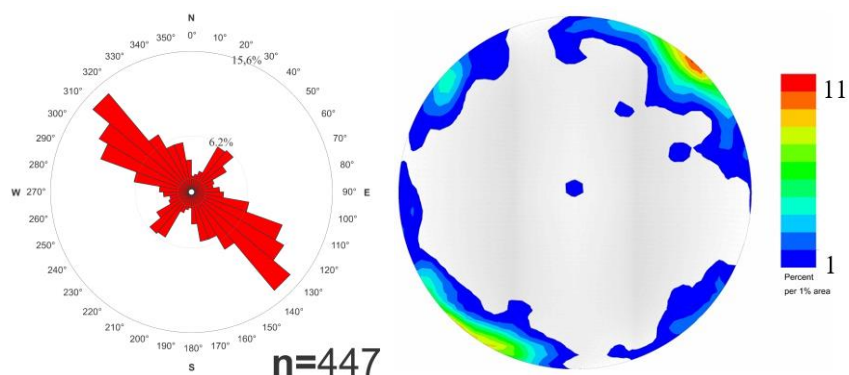
5.1.3 Análisis de orientaciones

A continuación, se realizará una descripción de las orientaciones de las depresiones cerradas, ejes axiales, drenajes, diaclasas, planos de clivaje, planos de estratificación, venas, para determinar las direcciones preferenciales de las estructuras geológicas y su relación con el desarrollo del sistema kárstico.

5.1.3.1 Análisis de la orientación de diaclasas. Se procesaron 447 datos de planos de diaclasas, los cuales fueron clasificados conforme a la clasificación descrita en Singhal y Gupta (2010), en la que se distinguen las diaclasas de acuerdo con su disposición respecto al eje de un pliegue en longitudinales, transversales y oblicuas. El diagrama rosa (Figura 30) muestra una dirección principal 110°-140° relacionado con las fracturas transversales de dirección NW-SE. Se observa una tendencia secundaria a 30°-40° relacionada con fracturas longitudinales en dirección NE-SW. Así mismo, se evidencia el desarrolló de fracturas oblicuas con orientación 150°-170°. A partir del diagrama de densidad de polos se puede establecer que los planos de diaclasa tienen una inclinación vertical a subvertical.

Figura 30

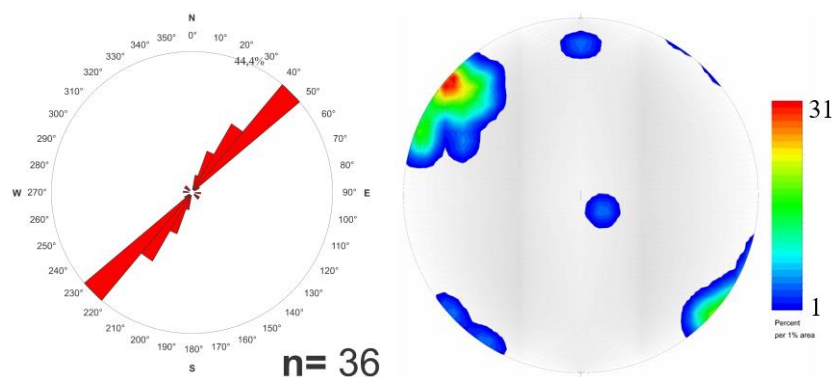
Diagrama rosa y diagrama de densidad de polos de los planos de diaclasa.



5.1.3.2 Análisis de la orientación de los planos de clivaje. El diagrama rosa (Figura 31) revela una tendencia principal 30°-50° evidenciando un comportamiento regional en zonas aledañas a los municipios de El Peñón y Bolívar. Los planos de clivaje según el diagrama de densidad de polos obtenido presentan un buzamiento vertical.

Figura 31

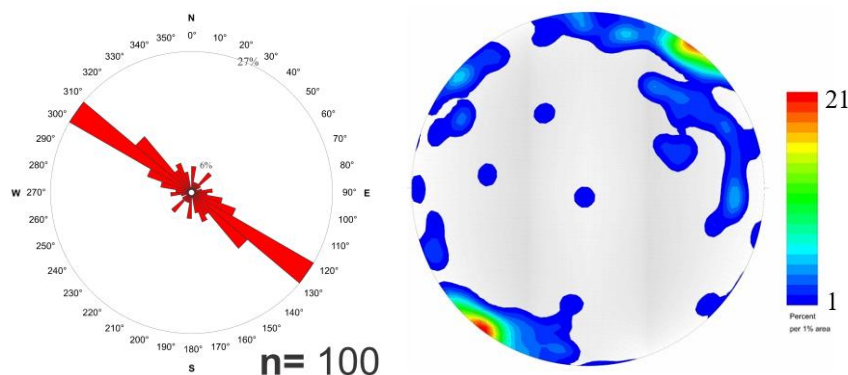
Diagrama rosa y diagrama de densidad de polos de los planos de clivaje



5.1.3.3 Análisis de orientaciones de venas. El diagrama rosa (Figura 32) exhibe una dirección preferencial 120°-140° relacionado con las fracturas de tensión descritas anteriormente. Los planos de venas presentan una inclinación vertical a subvertical según lo observado en el diagrama de densidad de polos.

Figura 32

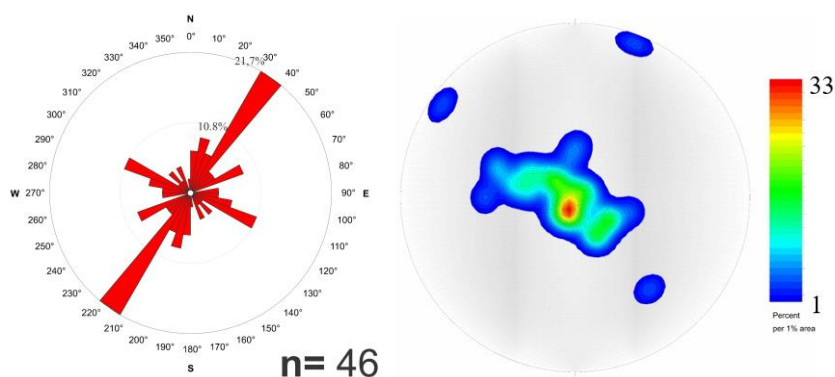
Diagrama rosa y diagrama de densidad de polos de los planos de venas



5.1.3.4 Análisis de la orientación de los planos de estratificación. El diagrama rosa (Figura 33) de la estratificación muestra una tendencia principal 30°-40° y una orientación secundaria con dirección 110°-120°. La primera indica la tendencia longitudinal de los pliegues, mientras la segunda se puede relacionar con los cierres de las estructuras plegadas que están presentes en la zona de estudio. Por otra parte, a partir del diagrama de densidad de polos se puede afirmar que los planos de estratificación tienden a ser subhorizontales, lo cual es un indicador de que los pliegues son abiertos a suaves, según la apertura de sus flancos.

Figura 33

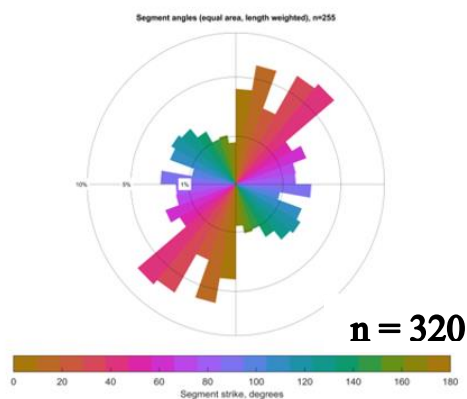
Diagrama rosa y diagrama de densidad de polos de la estratificación



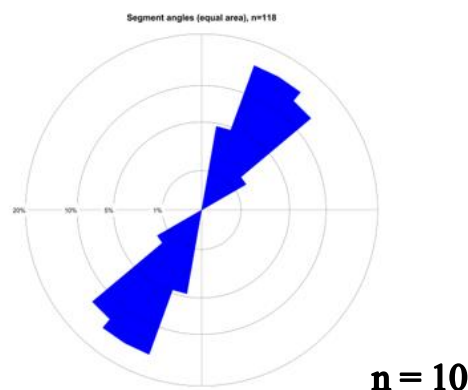
5.1.3.5 Análisis de orientaciones de depresiones cerradas. Para obtener las orientaciones de los ejes mayores de las dolinas se procesaron 320 datos de los ejes mayores en FracPaQ. El diagrama rosa (Figura 34) de la orientación de los ejes mayores refleja tres conjuntos de datos con orientaciones preferenciales. La orientación principal dada por el intervalo 30° - 50° coincide con la orientación preferencial de los planos de clivaje y con la tendencia secundaria de los planos de fractura longitudinales, seguido por una tendencia 110° - 140° que concuerda con la orientación principal de las diaclasas, finalmente unas orientaciones secundarias en un intervalo entre 150° - 170° y 0° - 10° desarrolladas por diaclasas oblicuas.

Figura 34

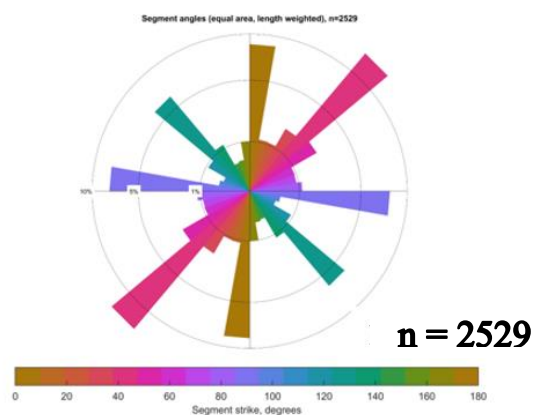
Diagrama rosa de los ejes mayores de las depresiones cerradas



5.1.3.6 Análisis de orientaciones de ejes de pliegues. Para obtener las orientaciones de los ejes de las estructuras plegadas regionales y locales se hizo por medio de FracPaQ. El diagrama rosa (Figura 35) resultante presenta una dirección preferente 30° - 40° .

Figura 35*Diagramas rosas de ejes de pliegues*

5.1.3.7 Análisis de orientaciones de drenajes. Se realizó el procesamiento de los drenajes por medio de FracPaQ, de este proceso se obtuvo resultado un diagrama rosa (Figura 36) que muestra las orientaciones de los cauces, es posible observar dos tendencias principales en 30° - 40° que coinciden con la orientación de los planos de clivaje y 0° - 10° , así como otras secundarias a 90° - 100° y 130° - 140° concordando con la dirección principal de los planos de diaclasas.

Figura 36*Diagramas rosas de drenajes*

5.1.4 Análisis cuantitativo de las fracturas

5.1.4.1 Atributos geológicos. Las características litológicas (Tabla 4), se tuvieron en cuenta para correlacionar con los demás parámetros en busca de patrones que permitieran ver la relación entre las estaciones de campo.

Tabla 4

Atributos geológicos de las estaciones de FracPaQ

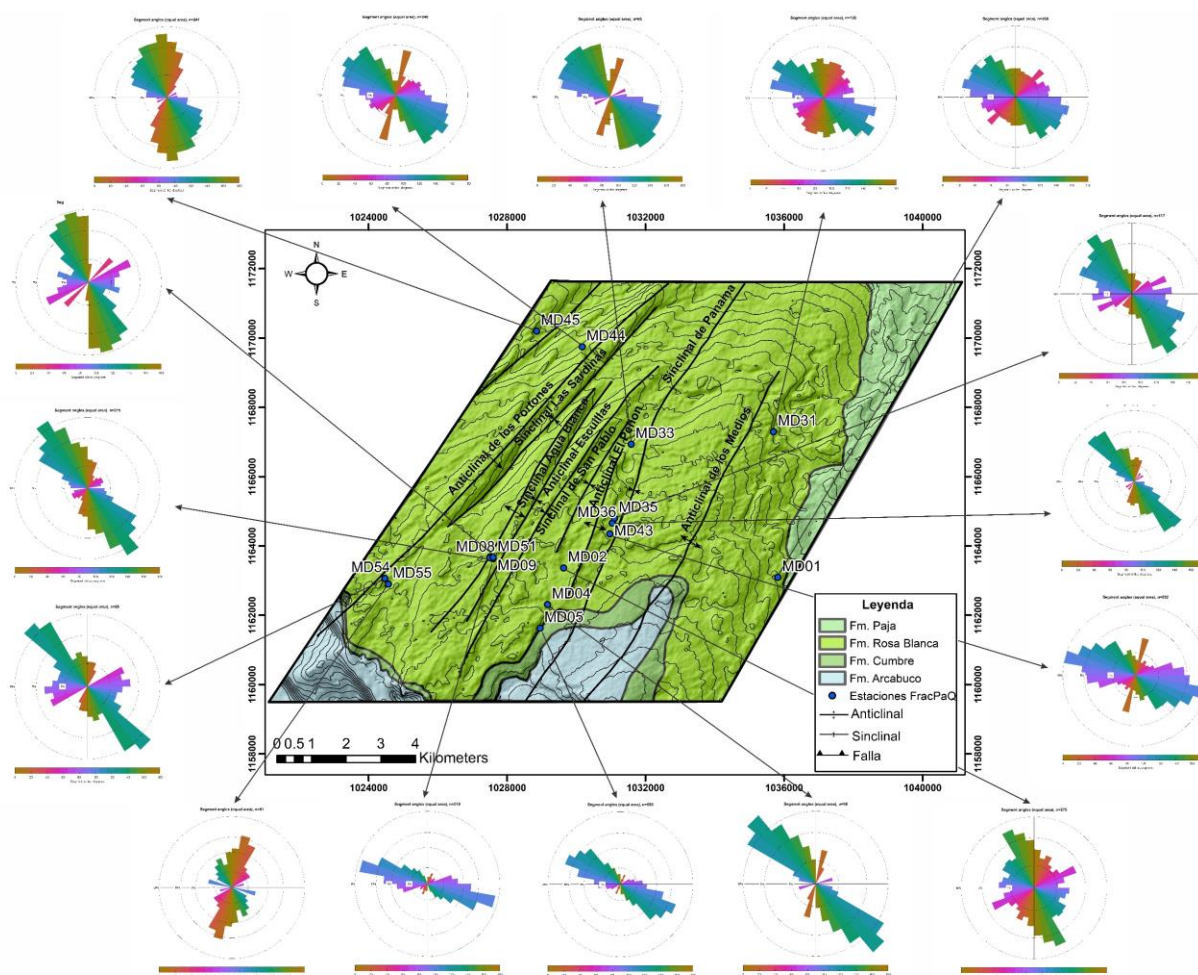
Estación	Litología	Estratificación (AB)
MD01	Lodolita calcárea	152/06
MD02	Lodolita calcárea	284/10
MD04	Lodolita calcárea	210/18
MD05	Caliza	201/08
MD08	Lodolita calcárea	245/17
MD09	Lodolita calcárea	282/04
MD31	Caliza	25/24
MD33	Caliza	241/22
MD35	Caliza	43/16
MD36	Caliza	356/08
MD43	Caliza	37/04
MD44	Caliza	265/05
MD45	Lodolita calcárea	305/10
MD51	Lodolita calcárea	214/18
MD54	Caliza	315/06
MD55	Caliza	54/12

5.1.4.2 Orientación a escala de afloramiento. A continuación, se presentan los diagramas rosas de los planos de diaclasas obtenidos a través del procesamiento en FracPaQ del registro fotográfico de las 16 estaciones seleccionadas. A modo individual los diagramas presentan unas orientaciones principales de fracturas 100° - 110° que son presentes en las estaciones MD04, MD09 Y MD43 las cuales se encuentran sobre una franja transversal a las estructuras presentes en la zona de estudio. Además, se encuentra una población con dirección 120° - 140° que son paralelos a los

planos de venas y ortogonales a los planos de clivaje y estratificación. La interpretación de los diagramas se hace de modo estadístico teniendo como referencia la moda y la media de las orientaciones de todas de las estaciones que fueron compiladas en la Figura 37. La primera moda presenta una dirección 100° - 120° , seguido de 130° - 150° y una tendencia secundaria 50° .

Figura 37

Mapa de diagramas rosa por estación de FracPaQ

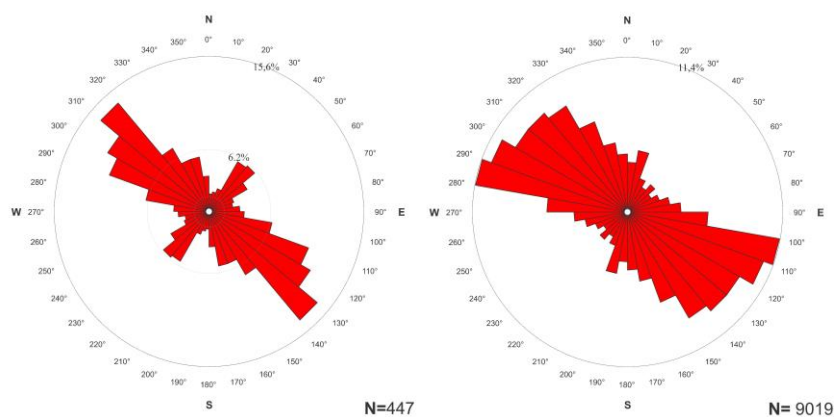


Las orientaciones de los planos de diaclasas medidos directamente en campo en comparación con los datos obtenidos por el procesamiento con FracPaQ muestran una alta concordancia (Figura 37). No obstante, la orientación secundaria 40° - 50° observada en el diagrama rosa de los datos de campo no se resalta tanto en el diagrama de FracPaQ, sin embargo, en los

diagramas rosa de las estaciones MD33, MD36, MD43, MD44 y MD51 esta tendencia si se observó (Figura 37).

Figura 38

Diagrama rosa de diaclasas medidos en campo y por FracPaQ



5.1.4.3 Análisis de densidad, intensidad y longitud de fractura. La estimación de la intensidad, densidad y longitud promedio los patrones de fracturas se realizó a través de FracPaQ. Los resultados se exponen en el gráfico de dispersión en la Figura 38 y en el mapa geológico de las Figuras 40 y 41, donde se observan rectángulos por estación, clasificados en un rango comparativo bajo, medio, alto y muy alto según los valores obtenidos. En estos rectángulos delimitadores se pueden visualizar también los patrones de fracturamiento de cada uno de los afloramientos seleccionados. Los resultados cuantitativos se muestran en la Tabla 5.

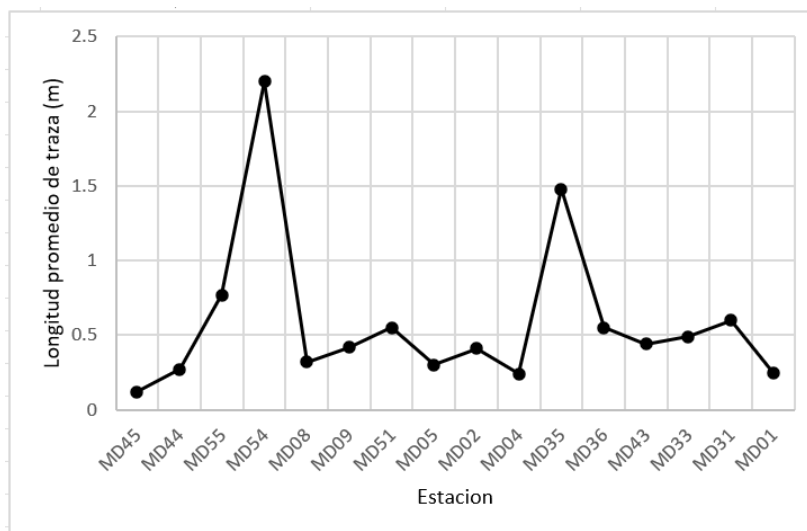
Tabla 5*Medidas de intensidad, densidad y longitud promedio*

Estación	Longitud promedio traza (m)	Intensidad (m^{-1})	Densidad (m^{-2})
MD01	0,25	5,85	52,23
MD02	0,41	9,74	58,68
MD04	0,24	7,29	195,05
MD05	0,3	4,43	96,33
MD08	0,32	3,48	49,61
MD09	0,42	5,81	146,84
MD31	0,6	6,42	38,15
MD33	0,49	3,1	41,05
MD35	1,48	5,21	13,12
MD36	0,55	3,61	41,18
MD43	0,44	8,02	48,04
MD44	0,27	9,74	87,6
MD45	0,12	2,1	33,02
MD51	0,55	5,13	26,83
MD54	2,2	4,23	87,3
MD55	0,77	4,32	13,6

5.1.4.3.1 Longitud Promedio. A partir de los valores de longitud promedio obtenidos durante el procesamiento de las imágenes de afloramiento en FracPaQ se encontró que los valores oscilan entre 0,12 m y 2,2 m siendo según Barton (1978) fracturas pequeñas en las estaciones MD55 y MD53 (Figura 39), en el resto de estaciones los afloramientos se caracterizan por tener fracturas muy pequeñas, las longitudes más grandes son asociadas a diaclasas verticales a subverticales y los valores mínimos se encuentran de forma subparalela a la estratificación. En general se observa que las longitudes de las fracturas son mayores en las estaciones con calizas con respecto de las lodolitas.

Figura 39

Gráfico de dispersión de longitud

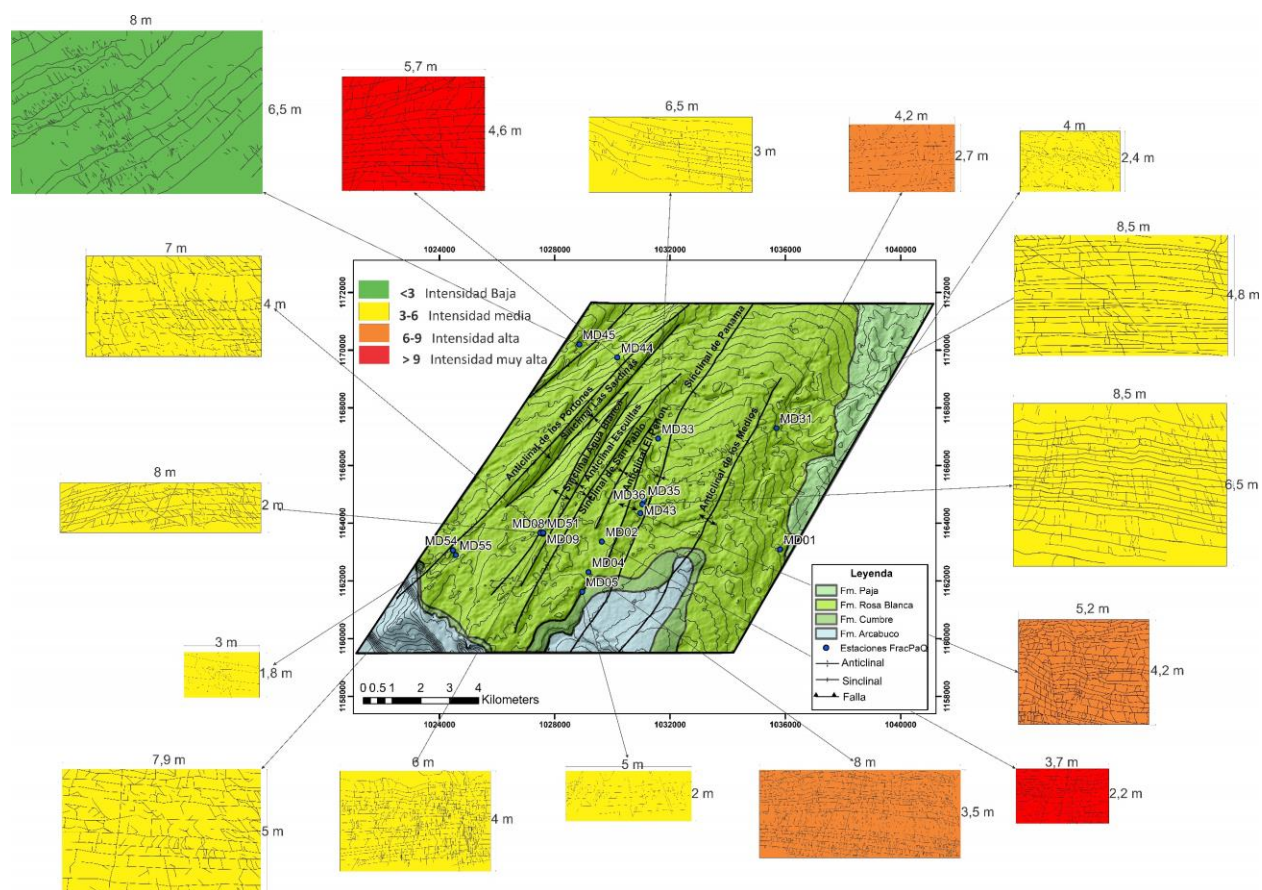


5.1.4.3.2 Intensidad y Densidad. Los parámetros de intensidad y densidad de fracturamiento obtenidos por medio de FracPaQ para lo cual se incluyeron planos de diaclasas y clivaje interpretados de las fotografías de las estaciones seleccionadas. Estos valores corresponden a estimaciones de la abundancia de fracturas de los afloramientos.

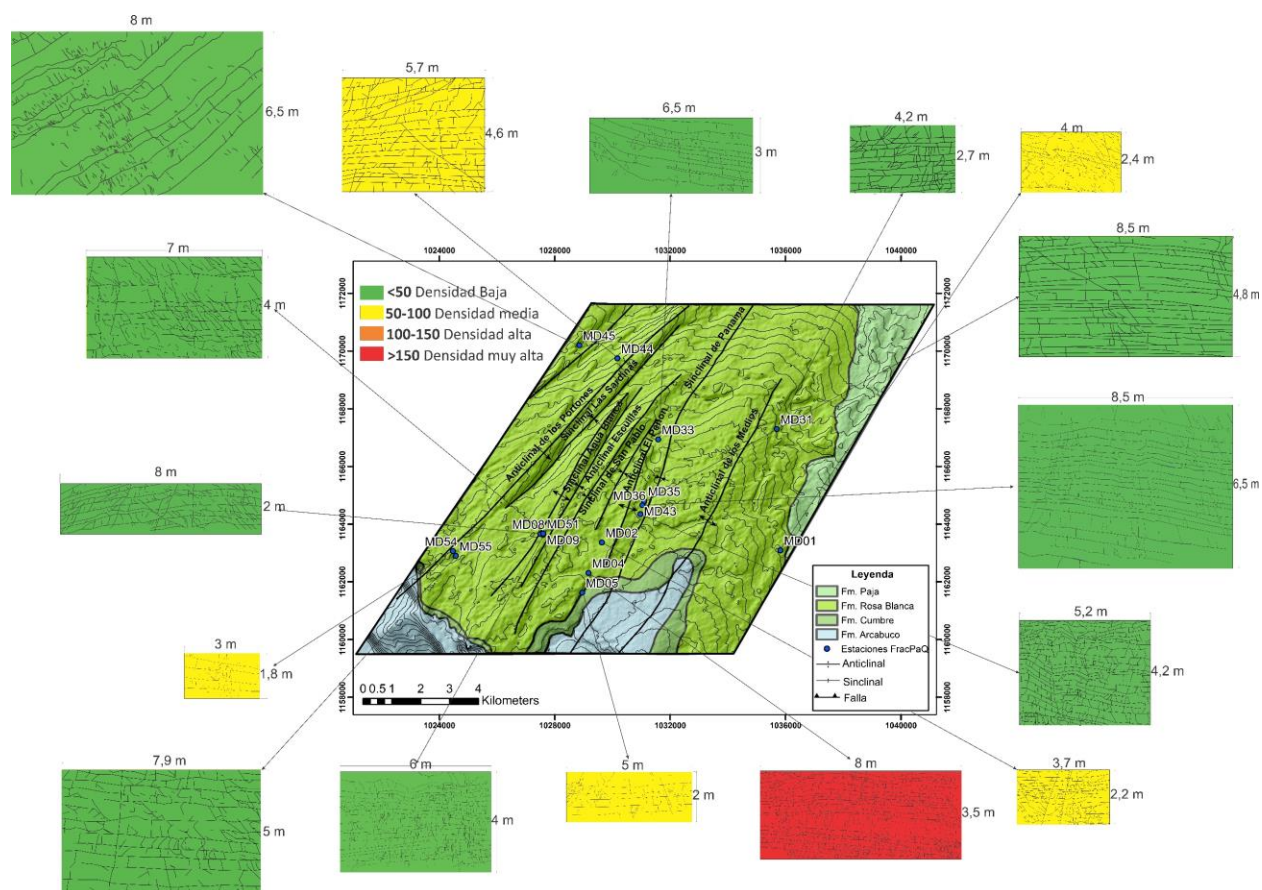
En la zona de estudio el sistema kárstico presenta en general una intensidad de fracturamiento media, con un valor promedio de $5,53 m^{-1}$. El valor más bajo corresponde la estación MD45 que se sitúa en el sector NW en cercanía a la falla de San Cayetano. Por otra parte, los valores más altos lo presentan las estaciones MD44 que se encuentra sobre una zona transversal que atraviesa el Anticlinal de Los Portones en el sector NW y la estación MD02 que se encuentra en el sector sur central. En la zona central sur en las estaciones MD04, MD02 y MD43 ubicadas en el flanco occidental del Sinclinal de Panamá estas presentan una alta y muy alta intensidad. Los valores más altos se asocian a que las estaciones se sitúan en las zonas de charnelas de los pliegues que corresponden a zonas de extensión.

Figura 40

Mapa de intensidad por estaciones



La densidad de fracturamiento en el área de trabajo es predominantemente de bajo con una media de 64.29 m^{-2} , a excepción de la estación MD04 que se sitúa en el flanco occidental del Sinclinal de Panamá que presenta un valor muy alto y los valores medios corresponden a las estaciones MD01, MD02, MD04, MD05, MD44 y MD54. Los valores mayores se asocian a que las estaciones se sitúan en las zonas de charnelas de los pliegues que corresponden a zonas de extensión.

Figura 41*Mapa de densidad por estaciones*

5.1.4.3.3 Conectividad. Para obtener la conectividad se procesaron los planos de discontinuidad que se visualizan en los afloramientos de las estaciones de campo involucrando los planos de diaclasa, clivaje y estratificación (Figura 42).

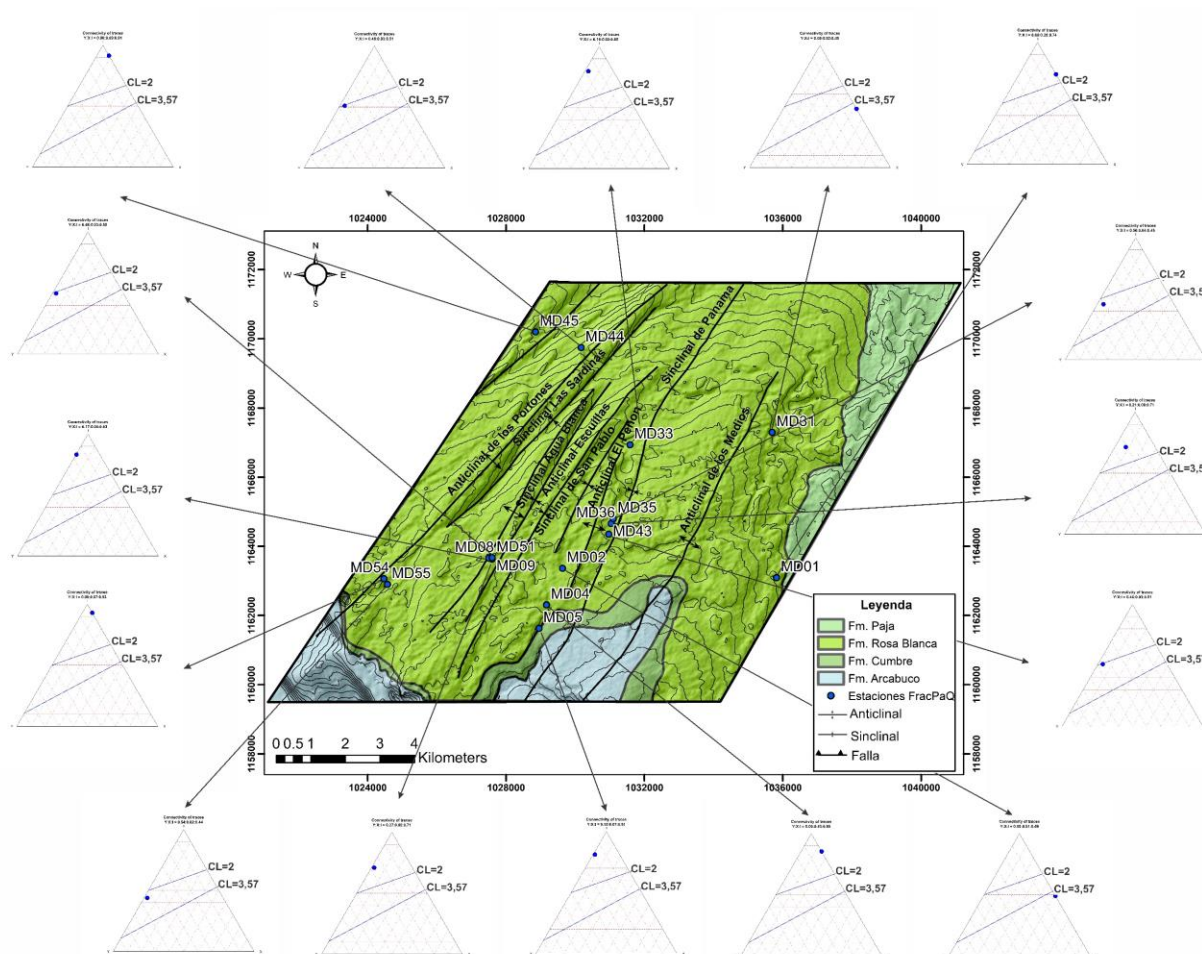
A modo general las redes con mayor conectividad se encuentran debajo de la línea de contorno CL:2 y las redes menos conectadas hacia el vértice I. En la zona de estudio los valores de mayor conectividad ($CL > 2$) corresponden a las estaciones MD02 que se encuentra en el flanco occidental del Sinclinal de El Peñón y MD31 que se sitúa en el flanco oriental del Anticlinal de los Medios. Las conectividades más bajas ($CL < 2$) se encuentran hacia el sector occidental comprendiendo las estaciones MD45, MD08, MD09 y MD54. Es posible evidenciar que en el área

de estudio existen redes de menor conectividad hacia el sector occidental y redes de mayor conectividad hacia el sector oriental.

Los valores medios a bajos predominantes en la intensidad, densidad y longitudes de fractura se traducen también en valores moderados a bajos de conectividad para los patrones de fracturas en la zona de estudio, estos parámetros brindan información a nivel superficial.

Figura 42

Mapa de conectividad por estación



5.1.5 Análisis Cinemático

A partir de los datos estructurales de diaclasas, venas, clivaje y planos estriados recolectados en las estaciones de campo, teniendo en cuenta el análisis poblacional de fracturas y

los criterios cinemáticos de planos estriados y fracturas secundarias (R y R') se realizó el procesamiento en el software WinTensor 5.9.0.2 que permite separar los planos de estructuras neoformadas de los demás con lo cual se pudo establecer un tensor de esfuerzos regional NW-SE (127°), que explica las direcciones de las principales estructuras que se encuentran en la zona de trabajo. Para la obtención de los tensores por estaciones se tuvieron en cuenta los conjuntos de datos de planos de diaclasas, venas, clivaje. Cabe mencionar que únicamente se obtuvieron dos datos de estrías en las estaciones de campo MD26 y MD17 lo cual no permitió incluir estos datos al momento de realizar la inmersión.

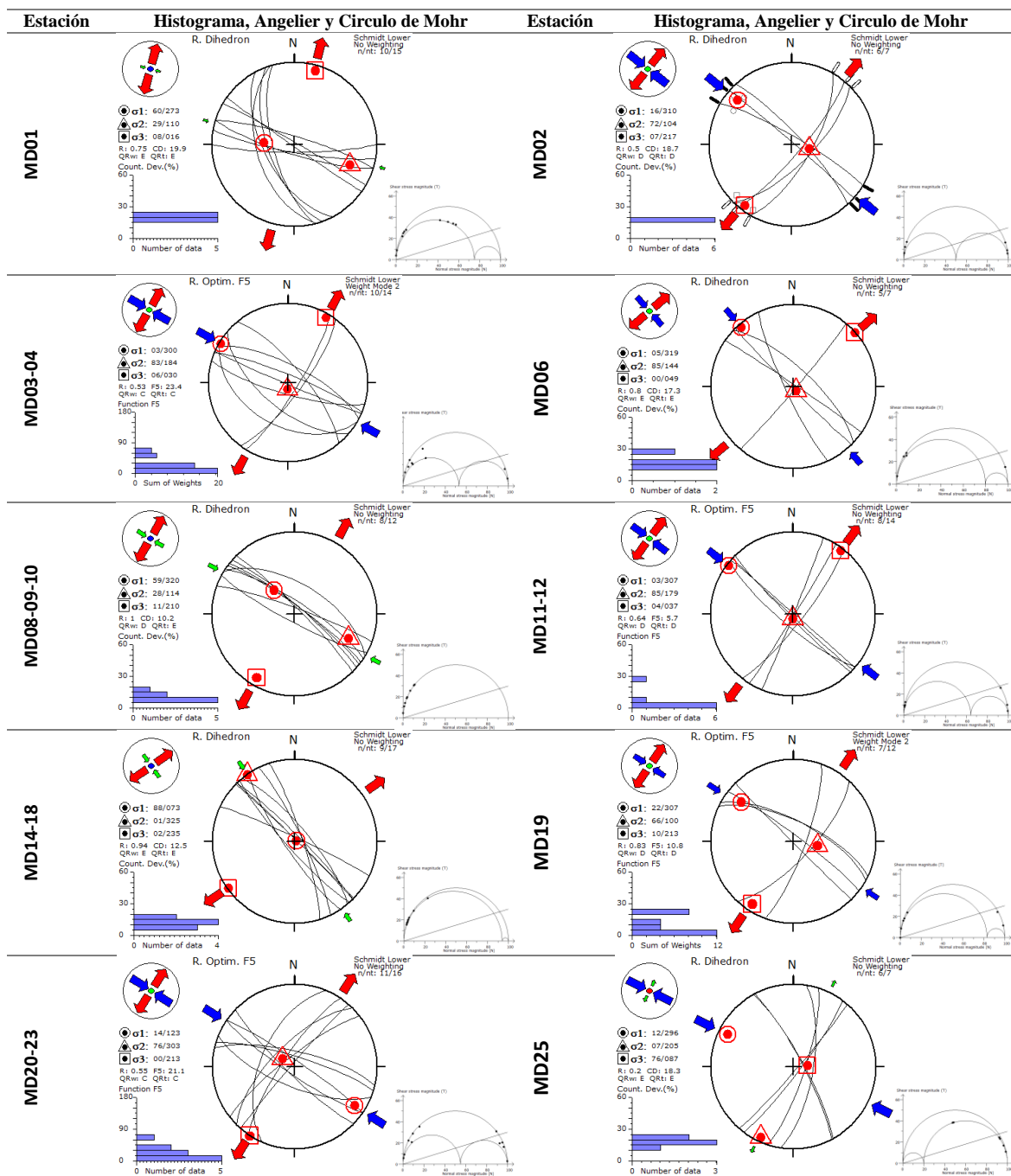
En este trabajo se representa gráficamente, los tensores resultantes en diagramas de flechas, la orientación de los ejes de esfuerzo principales (σ_1 , σ_2 y σ_3) además de los diagramas de Angelier y los círculos de Mohr. En adición se cuantifica los índices R y R'.

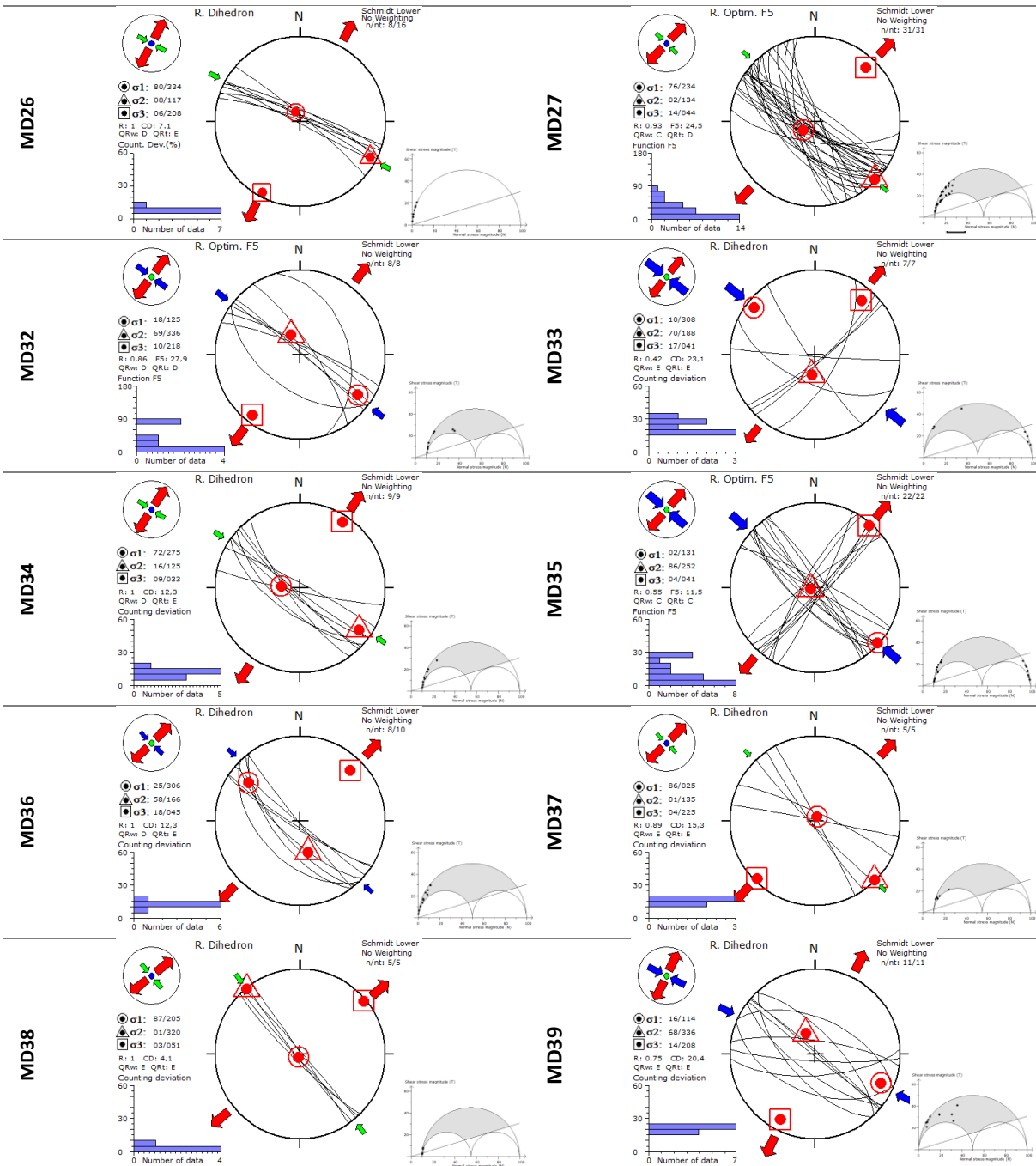
5.1.5.1 Estimación de tensores por estación. De las 58 estaciones de campo se calcularon 31 tensores, de los cuales 25 se obtuvieron a partir del procesamiento de datos de estaciones individuales y 6 de estaciones que fueron agrupados dada su cercanía espacial. El cálculo de tensores por estaciones se realizó para determinar si hay áreas que se comporten de forma diferente a la esperada a partir del tensor regional.

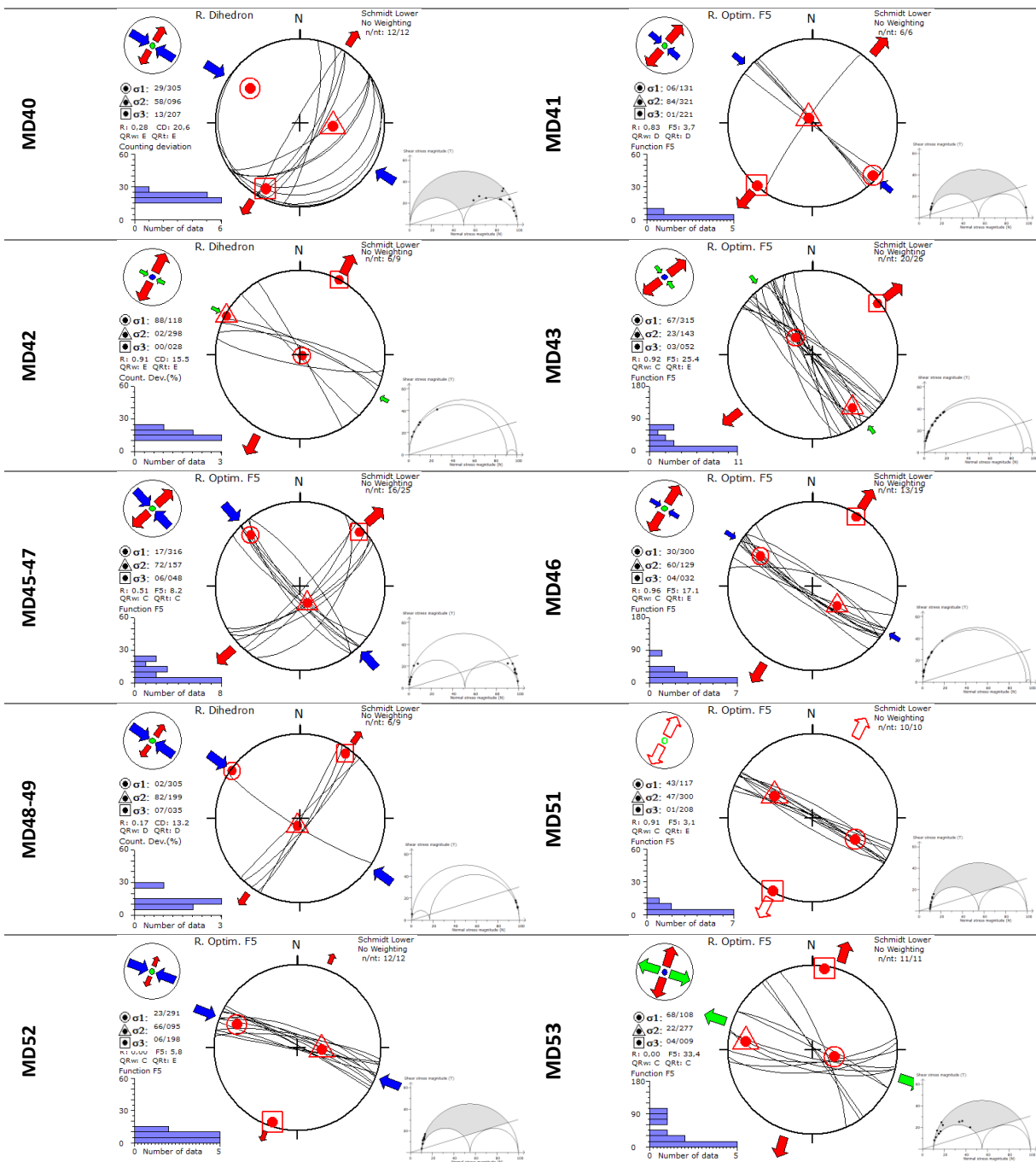
Los resultados de los análisis cinemáticos de cada una de las estaciones están sintetizados en las Figura 43 y Tabla 6 y su distribución espacial se puede observar en la Figura 44.

Figura 43

Tensores obtenidos por estación







Mohr obtenidos los datos de diaclasas y venas se encuentran en dentro de la envolvente de Mohr Coulomb y los planos de clivaje están en el campo estable.

Tabla 6

Síntesis de los resultados obtenidos en el procesamiento de los tensores por estación

Estacion	Coordenada		Litología	Metodo	Tensor	Grafica Tensor	n	N	Ejes esfuerzos			α	F5	R	R'	Shmax	QRt	Mapa Mundial Esfuerzos	Regimen de Esfuerzo
	X	Y							σ_1	σ_2	σ_3								
MD01	1035822	1163090.6	Lodolita	R Diedro	1		10	15	60/273	29/110	08/016			0.75	0.74	105	E	NF	Distensión pura
MD02	1027131	1164423.4	Caliza	R Diedro	2		6	7	16/310	72/104	07/217			0.5	1.5	129	D	SS	Transcurrencia pura
MD03-04	1029321	1162589	Lodolita y caliza	R óptimo	3		10	14	03/300	83/183	06/030	8.8	23.4	0.53	1.47	120	C	SS	Transcurrencia pura
MD06	1027154	1164345	Caliza	R Diedro	4		5	7	05/319	85/144	00/049			0.8	1.23	139	E	SS	Transcurrencia pura
MD08-09-10	1027500	1163659.1	Lodolita	R Diedro	5		8	12	59/320	28/114	11/210			1	1	120	E	NF	Distensión pura
MD11-12	1027606	1163369.5	Lodolita	R Diedro	6		7	14	04/308	85/173	04/038			0.94	0.95	145	E	NF	Distensión pura
MD14-18	1026546	1163176.2	Lodolita	R Diedro	7		9	17	88/073	01/325	02/235			0.94	1.06	136	E	SS	Transcurrencia pura
MD19	1026643	1163443.3	Lodolita	R óptimo	8		7	12	22/307	65/101	10/213	5.9	10.7	0.83	1.17	122	D	SS	Transcurrencia pura
MD20-23	1028168	1160590.4	Lodolita	R óptimo	9		11	16	14/123	76/303	00/213	12	21.1	0.55	1.45	123	C	SS	Transcurrencia pura
MD25	1027699	1160622.9	Lodolita	R Diedro	10		6	7	12/296	07/205	76/087			0.2	2.21	116	E	TF	Compresión pura
MD26	1035854	1162632.2	Caliza	R Diedro	11		8	16	80/334	08/117	06/208			1	1	118	E	NF	Distensión pura
MD27	1036331	1163542.6	Caliza	R óptimo	12		31	43	208/72	313/05	45/18	10.6	26.7	0.9	0.5	135	D	NF	Distensión pura
MD32	1031791	1167218.6	Caliza	R óptimo	13		8	14	127/23	321/66	219/05	8	26.9	0.93	1.5	129	D	SS	Transcurrencia pura
MD33	1031584	1166918.4	Caliza y lodolita	R óptimo	17		5	8	67/59	213/26	310/15	2	3.8	1	0.1	40	E	NF	Distensión pura
MD34	1031331	1166431.6	Caliza	R óptimo	18		9	12	275/72	125/16	33/09	6.2	11.4	1	0.1	123	E	NF	Distensión pura
MD35	1031104	1164797.9	Caliza	R óptimo	19		22	29	311/01	207/86	41/04	9	11.3	0.54	1.5	131	C	SS	Transcurrencia pura
MD36	1031040	1164656.9	Caliza	R óptimo	20		10	13	307/24	167/60	45/17	7.6	15	1	1.5	135	E	SS	Transcurrencia pura
MD37	1029804	1165810	Caliza y lodolita	R óptimo	21		5	7	25/86	135/01	225/04	4.8	15.1	0.89	0.5	135	E	NF	Distensión pura
MD38	1029286	1165303.1	Caliza	R óptimo	22		5	9	205/87	320/01	51/03	2.9	1.3	1	0.5	141	E	NF	Distensión pura
MD39	1029659	1165156.2	Caliza y lodolita	R Diedro	23		11	17	114/16	336/68	208/14			0.73	1.5	116	E	SS	Transcurrencia pura
MD40	1027656	1164347.1	Caliza y lodolita	R óptimo	24		12	15	305/29	96/58	207/13	27.6	72.5	0.23	1.5	122	E	SS	Transcurrencia pura
MD41	1027492	1164293.2	Caliza	R óptimo	25		6	7	133/09	318/81	223/01	5.4	3.2	0.75	1.25	133	D	SS	Transcurrencia pura
MD42	1027365	1164230.6	Caliza	R Óptimo	26		6	9	88/118	02/298	00/028			0.91	0.92	118	E	NF	Distensión pura
MD43	1030970	1164347.2	Caliza	R Óptimo	27		20	26	67/315	23/143	03/051	5.7	25.4	0.92	0.92	141	E	NF	Distensión pura
MD45-47	1030172	1169743.8	Caliza	R Óptimo	28		16	25	17/316	72/157	06/048	8.6	8.2	0.51	1.49	137	C	SS	Transcurrencia pura
MD46	1032117	1160376	Caliza	R Óptimo	29		13	19	30/300	59/129	04/032	5.6	17.1	0.96	1.04	122	E	SS	Transcurrencia pura
MD48-49	1032117	1160376	Arenisca	R Óptimo	30		6	9	02/305	82/199	07/035			0.17	1.81	125	D	SS	Transcurrencia pura
MD51	1027598	1163691.2	Caliza	R Óptimo	31		10	16	117/43	300/47	208/01	4	4.5	0.91	1.09	118	E	NF	Distensión pura
MD52	1028801	1162879.7	Caliza	R Óptimo	32		18	25	87/77	291/12	200/05	14	9.8	0.9	0.9	110	C	NF	Distensión pura
MD53	1024093	1163094.3	Caliza	R Óptimo	33		11	17	108/68	277/22	009/04	7.9	33.4	0	0.5	108	C	NF	Distensión pura
MD55	1024482	1163018.5	Caliza	R Óptimo	34		12	12	121/02	338/87	211/02	7.5	7.8	0.92	1.5	121	C	SS	Transcurrencia pura

Nota. (N) Número de datos iniciales. (n) Número de datos después del procesamiento. (F5) principal valor de la función de optimización. (α) Angulo entre la dirección de cizalla observada y modelada. (R) Radio de la diferencia los esfuerzos principales. (R') Índice de régimen de esfuerzo. (Shmax) Máximo esfuerzo horizontal. (QRt) Calidad del tensor.

5.1.5.2 Estimación del tensor regional. Para obtener con distintos indicadores tensores representativos a nivel regional se procesaron por separado 447 conjuntos de datos de diaclasas, 100 venas y 36 planos de clivaje, los cuales fueron tratados por medio de WinTensor con su

procesamiento inicial de diedros rectos y su subsecuente tratamiento por medio del método de optimización rotacional. Los tensores resultantes se presentan en la Figura 45 y Tabla 7.

Figura 45

Tensores de esfuerzo regionales

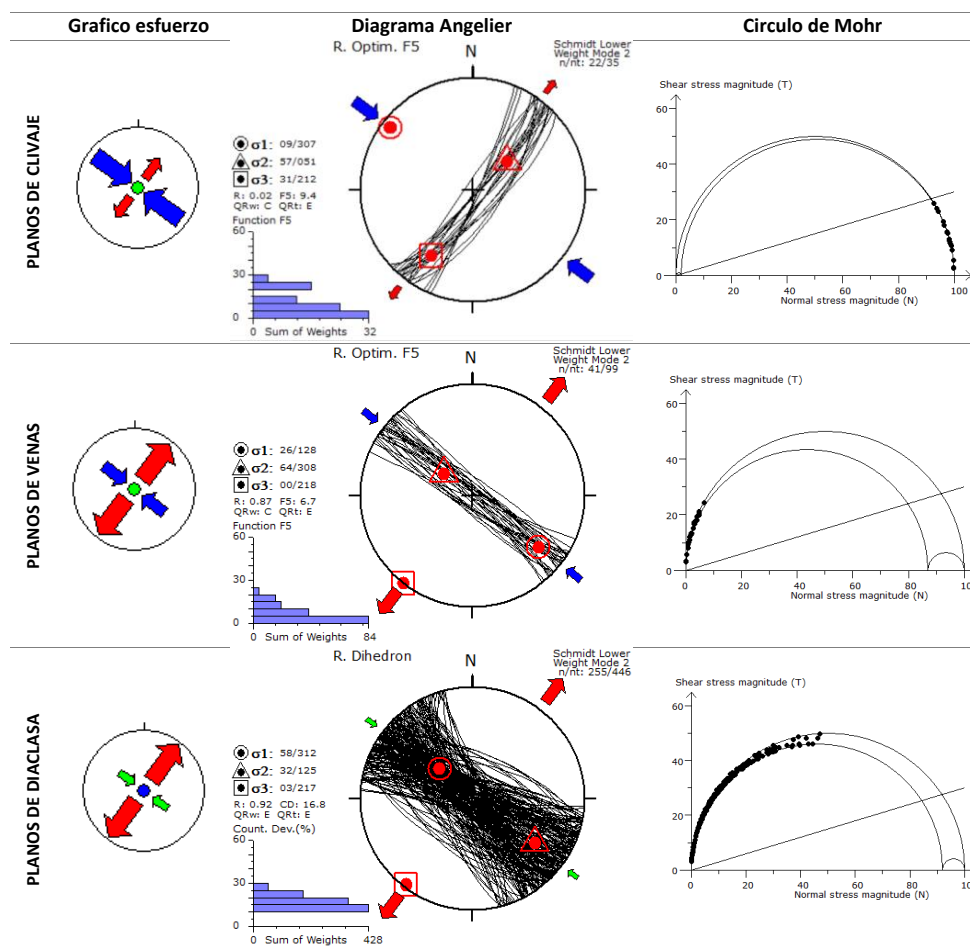


Tabla 7

Síntesis de los resultados del procesamiento de los planos por: clivaje, venas y diaclasa

Conjunto de datos	Metodo	Tensor	n	N	Ejes esfuerzos			α	F5	R	R'	Shmax	QRt	Mapa Mundial Esfuerzos	Regimen de Esfuerzo
					σ_1	σ_2	σ_3								
Planos de diaclasas	R Diedro		255	446	58/312	32/125	03/217			0,92	0,92	127	E	NF	Distensión pura
Planos de venas	R Optimo		41	99	26/128	64/308	00/218	4,7	6,7	0,87	1,13	128	E	SS	Transcurrencia pura
Planos de clivaje	R Optimo		22	35	09/307	57/051	31/212	8,8	9,4	0,02	1,98	127	E	SS	Transcurrencia pura

Nota. (N) Número de datos iniciales. (n) Número de datos después del procesamiento. (F5) principal valor de la función de optimización. (α) Angulo entre la dirección de cizalla observada y modelada. (R) Radio de la diferencia los esfuerzos principales. (R') Índice de régimen de esfuerzo. (Shmax) Máximo esfuerzo horizontal. (QRt) Calidad del tensor.

Los tensores obtenidos al procesar por separado los datos de planos diaclasas, venas y clivaje, indican un Shmax con direcciones 127° , 128° y 127° , respectivamente. El tensor regional resultante del promedio de los Shmax (127°) es concordante con la orientación preferencial de los planos de diaclasa, lo cual permite inferir que se tratan de fracturas de tensión que tienen una dirección preferencial 120° - 130° , también coincide con la tendencia principal de las venas y tiende a ser perpendicular con la dirección preferencial del clivaje.

5.1.6 Direcciones potenciales del flujo del agua

Las direcciones de flujo potencial del agua subterránea se definieron tomando como referencia las orientaciones preferenciales de las diaclasas, clivaje y drenajes del área de estudio y el tensor de esfuerzos estimado. En tal sentido, el flujo potencial del agua subterránea se da en la dirección 120° - 130° , por medio de las fracturas abiertas que sirven como zonas favorables para el transporte y almacenamiento del agua subterránea. No obstante, se resalta que, por medio de los planos de clivaje y estratificación, también se puede dar flujo del agua en dirección 30° - 40° como fue evidenciado en campo.

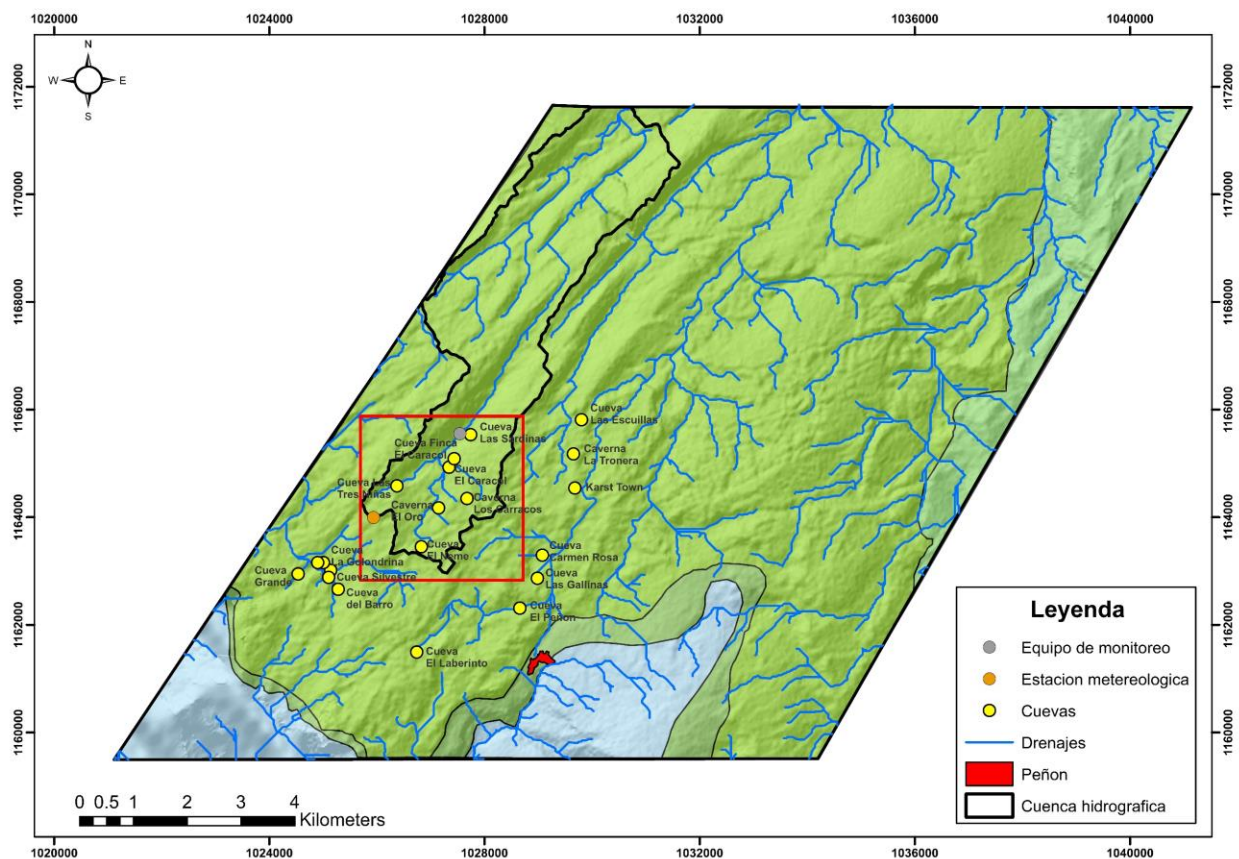
5.2 Análisis hidrodinámico

El análisis hidrodinámico de los flujos de agua subterránea de la zona se abordó por medio del estudio de la precipitación, del comportamiento de los caudales de la quebrada saliente de la cueva Las Sardinas (ver ubicación Figura 46), del análisis espacial de los caudales en diferentes

puntos de la cuenca hidrográfica analizada y de la información de los parámetros físicoquímicos del agua tomados en campo.

Figura 46

Mapa de ubicación del estudio hidrodinámico



5.2.1 Precipitación de la zona de estudio

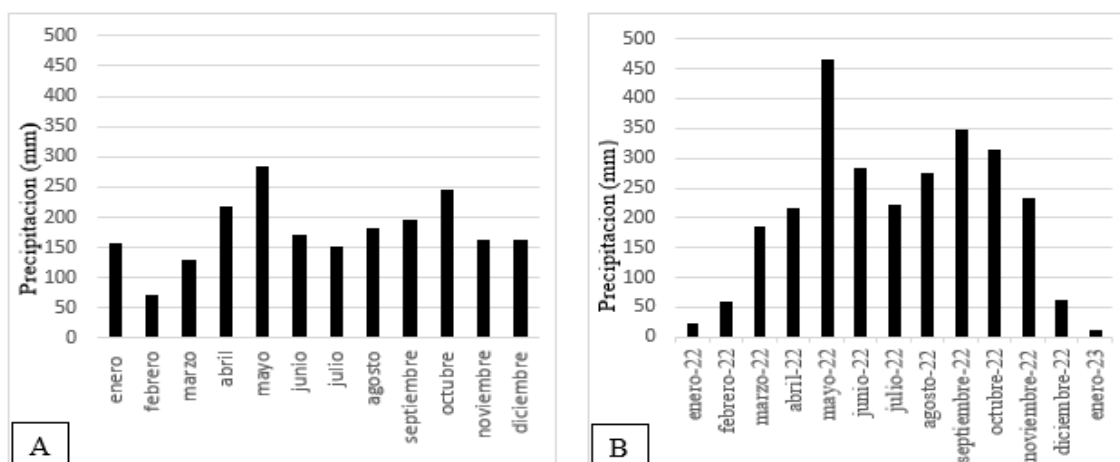
Se realizó el análisis de la pluviosidad del área durante el periodo de estudio (17 septiembre de 2022 hasta el 22 enero de 2023), a partir de los datos diarios de la estación del municipio del Bolívar de la cual también se obtuvieron los datos históricos de la lluvia. De igual forma, de la estación del Peñón se tuvo registro de precipitación cada media hora.

El Hietograma histórico de lluvia (Figura 47 A) muestra un régimen con un comportamiento bimodal. La primera época de lluvia bien marcada va desde abril (217 mm) hasta

junio (169 mm) con un pico en mayo (282 mm). En el mes de junio se presenta la primera época seca. La segunda época lluviosa abarca desde el mes de agosto (186 mm) a octubre (242 mm). La segunda época seca va desde los meses de noviembre y diciembre (160 mm), hasta marzo (126 mm) del siguiente año.

Figura 47

Hietograma de la estación de Bolívar



Nota. (A) Histórico de precipitación mensual promedio entre 1975-2022. (B) Precipitación mensual enero del año 2022- enero del año 2023.

En el Hietograma del año 2022 (Figura 47 B), se puede observar un régimen de lluvia con un comportamiento bimodal, la primera época seca bien pronunciada corresponde a los meses de enero (20.8 mm) y febrero (57.5 mm). La primera época lluviosa bien marcada cubrió desde el mes de marzo (185.4 mm) hasta el mes de junio (281.5 mm) con un pico en Mayo (465.3 mm). La segunda época de lluvia corresponde al periodo de julio (219,6 mm) a noviembre (232.8 mm) con un pico de lluvia en el mes de septiembre (364.2 mm). La segunda época seca bien marcada se presenta en el mes de diciembre (60.2 mm) que hace parte del inicio de la recesión del año 2023 representado por enero (9.8 mm). Se reporta una cantidad de lluvia total de 2668 mm, que es

superior al promedio de la estación de Bolívar de 1902 mm entre los años 1975 a 2022 (Figura 45B), por lo cual se plantea que es un año lluvioso para la zona de estudio.

5.2.2 Hidrodinámica del sistema kárstico en la salida de la Cuevas Las Sardinas

5.2.2.1 Curva de calibración. La curva de calibración para la quebrada que se sitúa en la salida de la cueva de las sardinas se obtuvo a partir de los aforos realizados en tres épocas diferentes: 18 de septiembre, 27 de noviembre de 2022 y 23 de enero de 2023. Como resultado de los aforos realizados se obtuvieron los caudales para cada una de las épocas, los niveles se tomaron de las mediciones realizadas con el TD-Diver. A partir de los datos de la Tabla 10 se grafican los niveles en función de los caudales, se proyectaron líneas de tendencia con función exponencial, logarítmica y polinómica y de ellas, se eligió la línea de tendencia polinómica como la ecuación de la curva de calibración, al ser la que mejor se acomoda a los datos presentando el mayor coeficiente de determinación R^2 .

En la Figura 48 se observa que el caudal de la quebrada saliente de la cueva Las Sardinas presenta el valor más alto en el aforo realizado el 18 de septiembre (época lluviosa) y una disminución en el segundo aforo del 27 de noviembre (finales de la época lluviosa) que se puede explicar por su cercanía con el inicio de la época de recesión que inicia en diciembre, en el tercer aforo del 23 de enero hay una fuerte disminución del caudal (época seca), comportamiento acorde a los registros de lluvia de los mismos meses (Figura 47B), que evidencian la influencia de la lluvia local en este punto.

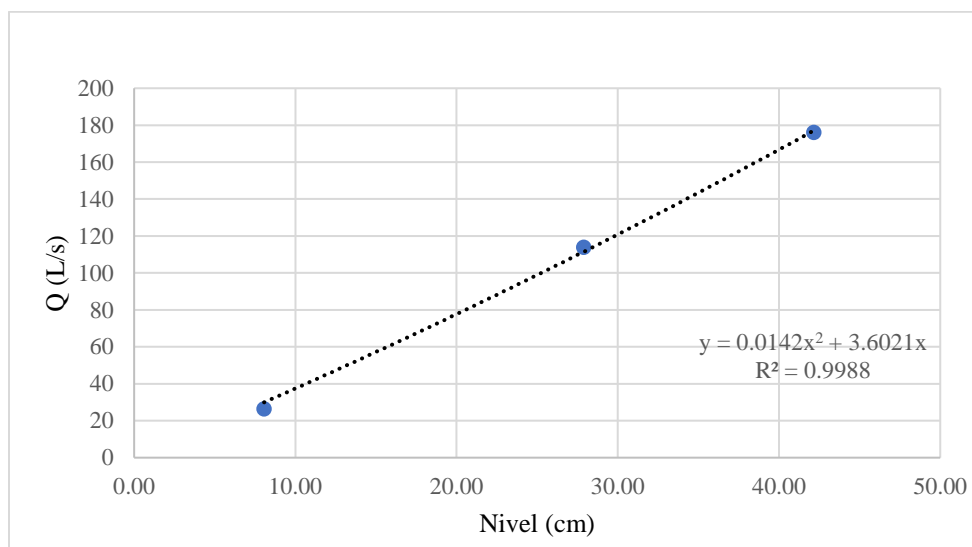
Tabla 8.

Caudales y niveles de la quebrada saliente de la cueva Las Sardinas

Fecha	Aforo	Nivel TD-Diver (cm)	Caudal (L/s)
18/09/2022	1	42	176.1
27/11/2022	2	28	113.9
23/01/2023	3	8	26.5

Figura 48

Curva de calibración



5.2.2.2 Caudales. Se presenta el hidrograma obtenido de los caudales que representa el comportamiento de la quebrada saliente de la cueva Las Sardinas. Se muestran los datos de caudales representados por la serie de tiempo de cada 30 minutos entre el 18 de septiembre a las 3 pm hasta el 23 de enero a las 8:30 am, con los datos de lluvia reportados por la estación de Bolívar (Figura 49) y por la estación de El Peñón (Figura 50) del mismo periodo de tiempo.

El hidrograma muestra un flujo continuo con picos que evidencian una respuesta rápida de los caudales ante los eventos de lluvia registrados en ambas estaciones, que permite plantear una recarga local del sistema. Se observa que, una vez terminado el evento de lluvia la descarga de la

escorrentía superficial es rápida y el hidrograma retorna rápidamente a su flujo base con periodos de recesión que muestran el descenso natural del almacenamiento del acuífero que se encuentra en contacto con la corriente superficial.

Figura 49

Caudales cada media hora versus lluvia estación de Bolívar entre el 18 de septiembre de 2022 hasta el 23 de enero de 2023.

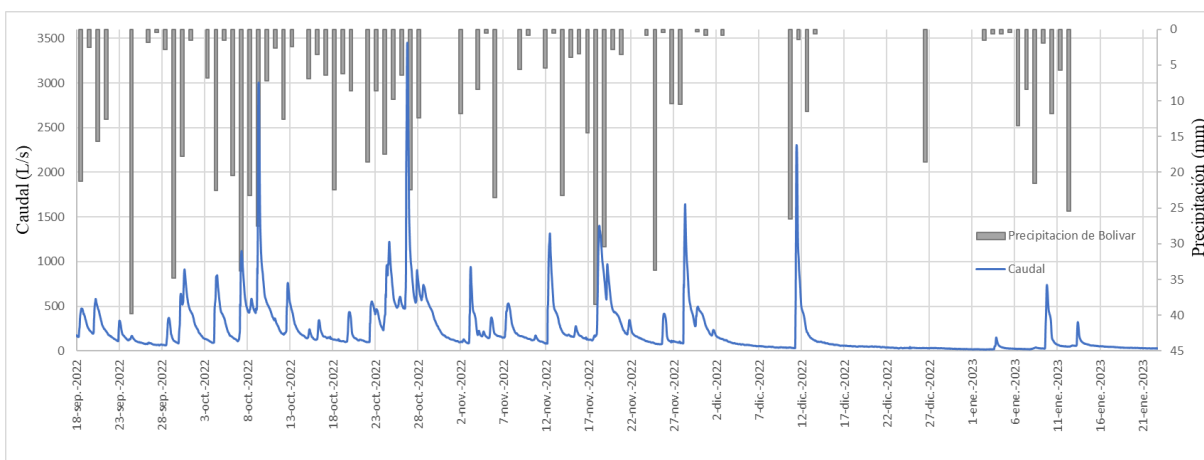
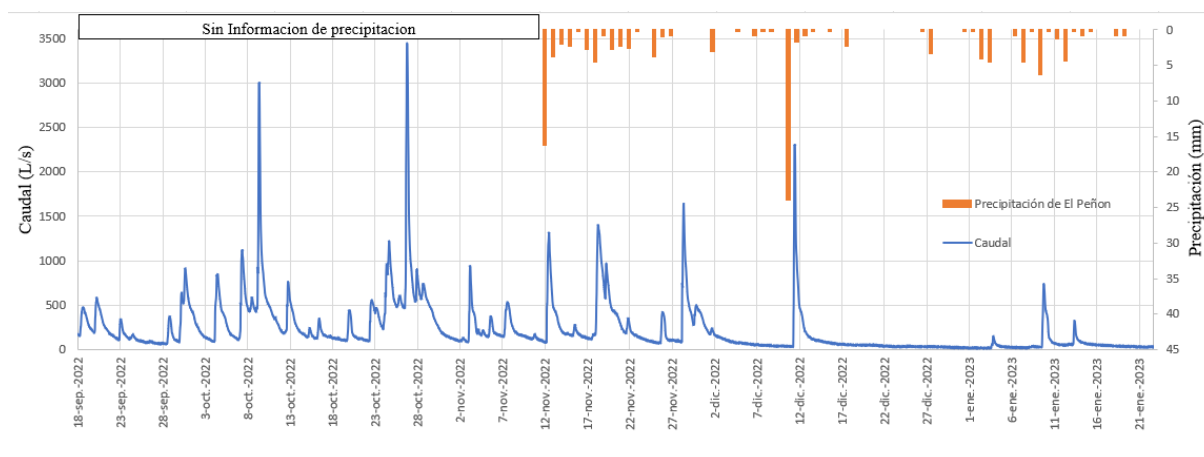


Figura 50

Caudales cada media hora vs lluvia estación de El Peñón entre el 18 de septiembre de 2022 hasta el 23 de enero de 2023.



De acuerdo con la rápida respuesta del sistema ante los eventos de lluvia conforme con lo expuesto por Paiva & Cunha (2020) y Željka *et al.* (2018) el sistema kárstico posee conductos bien desarrollados y organizados, que se caracteriza por presentar un flujo rápido después de un evento de lluvia.

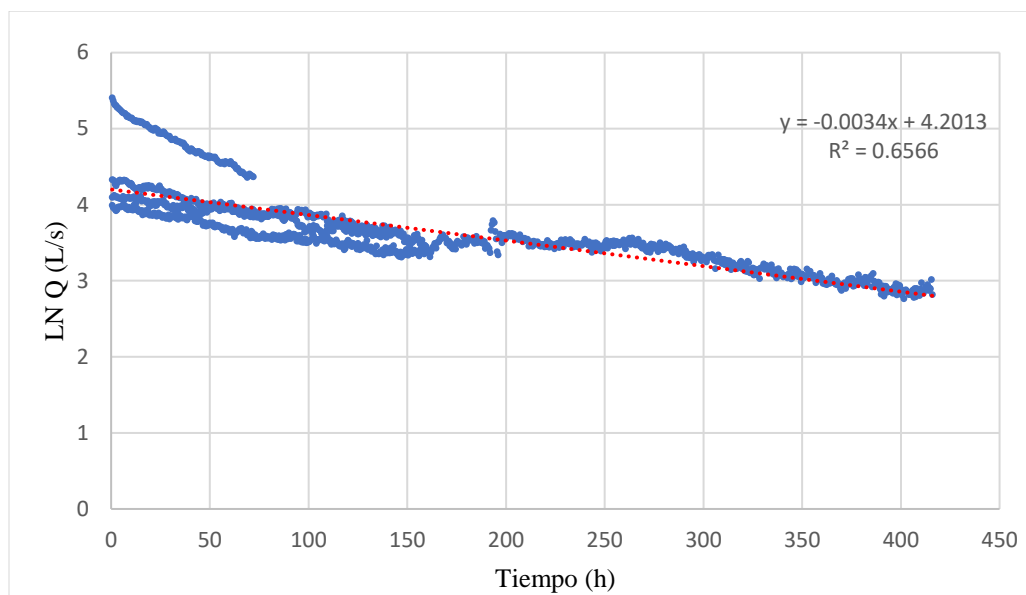
A partir del hidrograma (Figura 50) fue posible determinar que el sistema kárstico genera respuesta ante eventos de precipitación registrados en la estación de El Peñón cuando estos sobrepasan los 5 mm, por debajo de esos valores el agua se queda en la cobertura vegetal y los primeros centímetros del suelo, por arriba en cambio, se genera un aumento en el nivel del cauce medido hasta alcanzar su pico máximo luego de seis horas de ocurrido el evento de precipitación.

Con base en el hidrograma se seleccionaron cuatro periodos de recesión (Tabla 9) de 14, 7, 17 y 7 días que permitieron construir una aproximación a la curva maestra de recesión (CMR, Figura 51), puesto que para obtener una curva más representativa se debe contar con una serie de tiempo de caudales de varios años. De esta CMR se estima para el sistema una constante de recesión de $0.0034 \text{ (hora}^{-1}\text{)}$, la cual indica un tiempo de vida media de 294 horas es decir 12,25 días, que no es más sino el tiempo necesario para que el flujo base reseda a la mitad del flujo inicial (punto donde $Q(t)/Q(o)=0,5$).

Tabla 9

Periodos de recesión

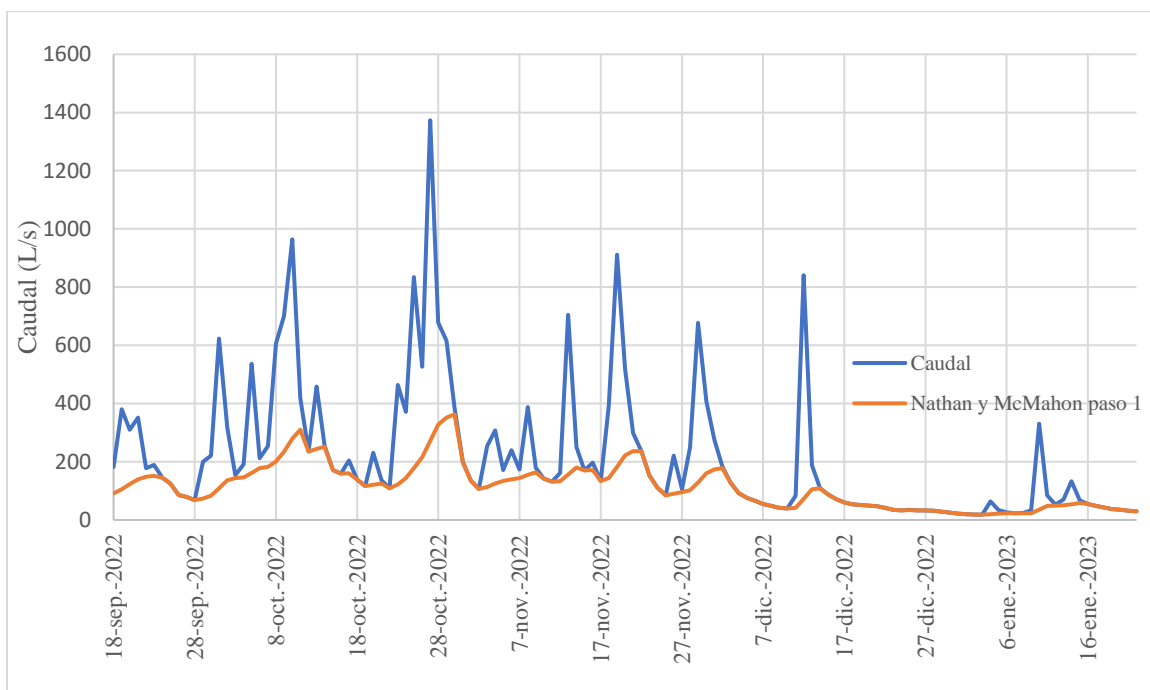
Recesión	Periodo	Duración aproximada
1	22/11/2022- 25/11/2022	14 días
2	4/12/2022- 11/12/2022	7 días
3	17/12/2022- 3/01/2023	17 días
4	16/01/2023-23/01/2023	7 días

Figura 51*Curva maestra de recesión*

5.2.2.3 Determinación de la fracción flujo base. Con los datos de caudales obtenidos se realizó una estimación de la fracción del flujo base de la quebrada saliente de la cueva Las Sardinas, para el periodo monitoreado, utilizando el método gráfico y de algoritmos. En el método gráfico se empleó el de la línea recta para los periodos de recesión (Tabla 9) obteniendo una fracción de flujo base entre 21% y 66% con un valor promedio de 38.25%. Para el método de algoritmos se empleó el software desarrollado por Gómez y Gómez (2012), se aplicaron los usos de 1 parámetro, 2 parámetros y Nathan y McMahon Paso 1 (Figura 52), encontrando que este último es el que mejor se ajusta al hidrograma en los periodos de recesión. El valor obtenido de flujo base es de 52.91%.

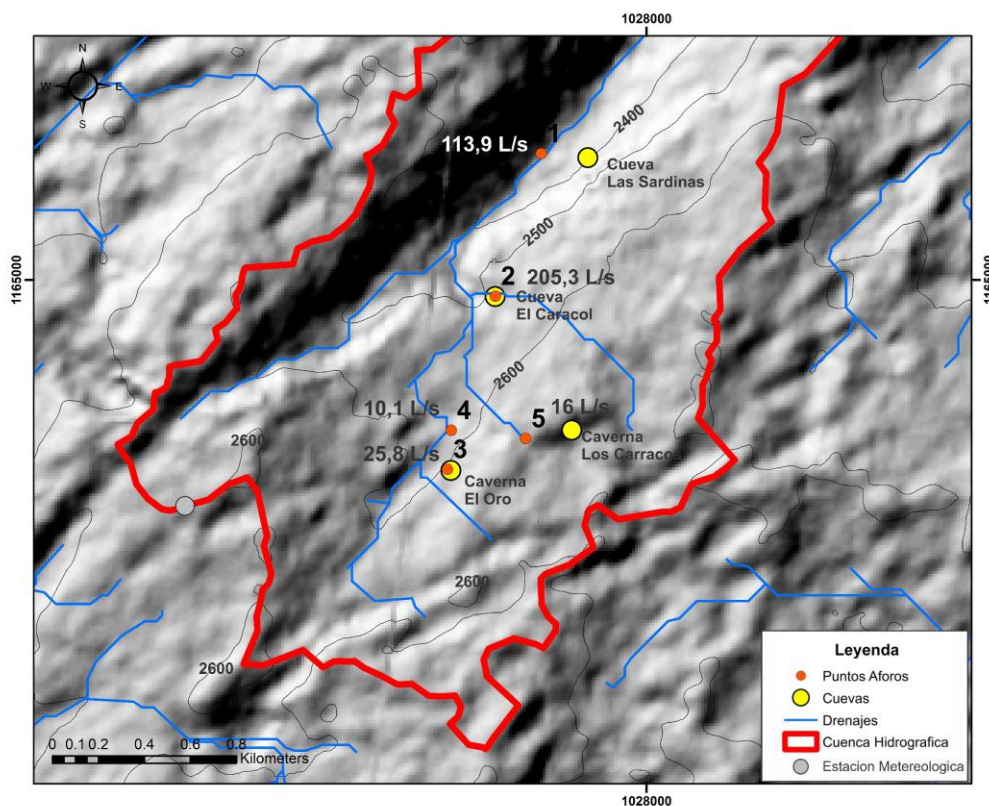
Figura 52

Separación del flujo base a partir del algoritmo Nathan y McMahon Paso 1



5.2.3 Análisis espacial de caudales

El análisis espacial de caudales se realizó a partir de los calculados en los aforos realizados entre el 26 y 27 de noviembre del año 2022, en cinco puntos que se encuentran distribuidos a lo largo de la cuenca hidrográfica, en esta se ubican la cueva Las Sardinas (2400 msnm), El Caracol (2500 msnm) y las cavernas de Los Carracos (2600 msnm) y El Oro (2600 msnm), localizados en la zona occidental del sistema kárstico de El Peñón (Figura 53). La Tabla 12 contiene los caudales y velocidad del agua promedio en cada uno de los puntos en mención.

Figura 53*Mapa de análisis temporal de caudales***Tabla 10***Análisis espacial de caudales en la cuenca hidrográfica*

Punto	Lugar	Velocidad (m/s)	Caudal (L/s)	Conductividad eléctrica (μs/cm)
1	Cueva Las Sardinas (quebrada Saliente)	0.26	113.9	140
2	Cueva del Caracol	0.33	205.3	143
3	Cueva del Oro (Entrada)	0.03	25.8	156
4	Cueva del Oro (Salida)	0.03	10.1	153
5	Caverna Los Carracos	0.05	16	146

A partir de la Figura 53 y los datos suministrados en la Tabla 10 fue posible determinar que el caudal y la velocidad promedio del flujo del agua subterránea presenta una tendencia que aumenta hacia el norte en la cuenca hidrográfica estudiada (aguas abajo de la corriente principal).

Esto con excepción de la medición realizada en la cueva del Caracol, en donde es importante mencionar que la hidrodinámica del agua subterránea está influenciada por la presencia de una cascada que se encuentra a la entrada de la cueva, la cual provoca que el flujo del agua sea mayor, teniendo una velocidad promedio de 0.33 m/s, y que en consecuencia se presente el valor más alto de caudal dentro de la cuenca.

En relación con la hidrodinámica evaluada en la cueva del Oro se evidencia que existe una disminución del caudal en la salida con un valor de 10.1 (L/s) con respecto al obtenido en la entrada 25.8 (L/s), así como una velocidad del flujo de agua de 0,03 m/s que permanece constante. Esto indica que existe un represamiento de agua subterránea al interior de los salones que componen la cueva del Oro, lo cual fue evidenciado en varias partes del curso del agua dentro de la cueva ya que se observaron empozamientos al momento de realizar el aforo.

5.2.4 Parámetros fisicoquímicos

El análisis se enfocó en el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos (conductividad eléctrica, temperatura y pH) medidos en el agua subterránea, agua de manantial y corrientes superficiales en 15 puntos distribuidos a lo largo de la zona de interés que pueden ser observados en la Figura 54 y sintetizados en la Tabla 11.

En la subcuenca hidrográfica situada en el sector occidental (puntos de muestreo 10,11 y 12, Figura 50) se presenta un aumento de los valores de conductividad hacia el oeste en dirección del flujo del cauce, estos valores oscilan entre 185 y 240 ($\mu\text{s}/\text{cm}$) con un promedio de 212 ($\mu\text{s}/\text{cm}$). En zona oriental (puntos de muestreo 8,9 y 16 Figura 50) la subcuenca presenta un aumento de la conductividad eléctrica en dirección norte de acuerdo con el flujo del agua hacia las partes más bajas. En la subcuenca situada hacia la parte central (puntos de muestreo 1, 2, 3, 4, 5 y 6, Figura 50) no se observa una variación significativa de la conductividad eléctrica con valores entre 156 y

140 ($\mu\text{s}/\text{cm}$) con una disminución de la conductividad hacia el norte relacionado con un aumento de los caudales (Tabla 12).

Las temperaturas varían entre 14,8 y 19,5 ($^{\circ}\text{C}$) con un promedio de 16,1 ($^{\circ}\text{C}$) mostrando valores acordes con la temperatura ambiente de la zona de recarga. Los valores de pH no muestran variación espacial registrando entre 7,1 y 8,8 (aguas neutras a básicas) con un valor promedio de 8,2 (aguas básicas) asociado a la litología dominante de calizas y lodolitas que conforman la formación Rosa Blanca que produce el aumento de la mineralización en el agua producto de los procesos de disolución.

Figura 54

Mapa de puntos de medición de parámetros fisicoquímicos

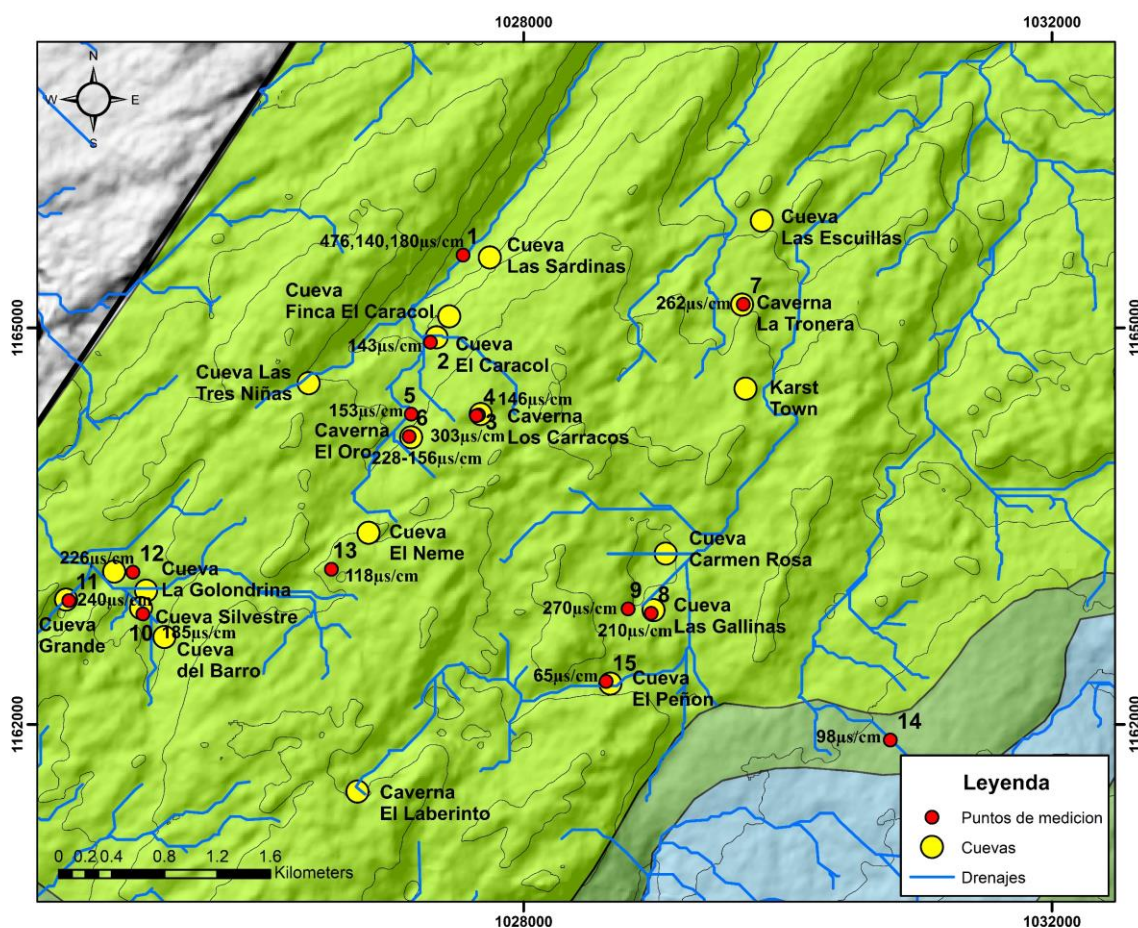


Tabla 11*Síntesis de mediciones de parámetros fisicoquímicos en los puntos de muestra.*

Punto	Sitio muestreo	Fecha	pH	T (°C)	Conductividad (µs/cm)
1	Cueva Las Sardinas (Quebrada saliendo)	18/09/2022	7,74	14,55	476
	Cueva Las Sardinas (Quebrada saliendo)	27/11/2022	8,8	-	140
	Cueva Las Sardinas (Quebrada saliendo)	23/01/2023	7,49	15,14	180
2	Cueva El Caracol	27/11/2022	8,33	-	143
3	Caverna Carracos (manantial- parte endokárstica)	13/11/2022	8,43	15,35	303
4	Caverna Carracos (corriente superficial)	26/11/2022	7,58	16,4	146
5	Cueva El Oro (salida)	27/11/2022	8,33	-	153
6	Cueva El Oro (Río-parte endokárstica)	13/11/2022	8,31	15,5	228
	Cueva El Oro (Río-parte endokárstica)	26/11/2022	7,16	16	156
7	Caverna La Tronera (Río-parte endokárstica)	12/11/2022	7,89	15,64	262
8	Cueva Las Gallinas (Quebrada saliente)	15/11/2022	8,25	16,51	210
9	Cueva Las Gallinas (Manantial)	15/11/2023	8,16	16	270
10	Cueva La Golondrina (Manantial)	16/11/2022	8,49	16,36	185
11	Cueva Grande (Manantial)	16/11/2022	8,31	17,12	240
12	Cueva Silvestre (Manantial)	16/11/2022	8,49	15,46	226
13	Cueva La Esperanza (Manantial)	13/11/2022	8,4	14,8	118
14	Corriente vía Ojo de Agua- El Peñón	14/11/2022	8,61	15,03	98
15	Corriente (Frente Cueva La Virgen)	15/11/2022	8,25	16,7	65

6. Discusiones

Como aporte al análisis estructural del sistema kárstico se presenta la cartografía de los planos axiales de pliegues menores que se encuentran en medio de los pliegues regionales, los cuales siguen la misma tendencia NE de las estructuras principales. Cabe resaltar, que el trazo de los planos axiales ya había sido realizado por parte de Barajas y Gelvez (2019), sin embargo, en este trabajo se hizo un ajuste de los trazos y se les asignó un nombre de acuerdo con su cercanía geográfica con respecto a las cavidades kársticas y centros poblados. Se determinó una zona de cizalla situada sobre el flanco oriental del Sinclinal de Las Sardinias, definido con base en las venas de calcita sigmoidales en z, que muestran una cizalla con desplazamiento dextral.

Los lineamientos de la interpretación regional y de la zona de estudio presentan una misma orientación preferencial con dirección 40° , la cual concuerda con la tendencia de los ejes axiales de los pliegues regionales y locales. El clivaje que se desarrolla en las rocas de la Formación Rosa Blanca presenta una dirección 40° , por lo cual se establece que esta foliación secundaria está asociada al mismo evento tectónico que produjo las estructuras regionales y locales presentes en la zona de estudio. Las diaclasas poseen una dirección principal 130° - 140° siendo fracturas transversales en relación con los ejes de los pliegues y de tensión al coincidir con la dirección preferente de las venas, dando una aproximación de la orientación del tensor de esfuerzo (120° - 130°) de la zona, y una secundaria 40° que son longitudinales en relación con los ejes de los pliegues, estas orientaciones coinciden con las dos familias de diaclasas establecidas por Rodríguez y Lasso (2019) que presentan una dirección 40° - 60° y 140° - 150° . Los drenajes del área de trabajo poseen una tendencia principal 40° y 10° seguido por dos orientaciones secundarias 180° y 150° , por tanto, se establece que los drenajes están controlados principalmente por la dirección los lineamientos, ejes axiales, clivaje y diaclasas.

A partir de 320 depresiones cerradas identificadas en este trabajo en la zona de estudio se establecieron dos orientaciones preferenciales con dirección 40° y 10° , seguido por dos orientaciones secundarias 130° y 100° . Las direcciones principales de las depresiones cerradas determinadas en este trabajo pueden ser contrastadas con las halladas en Barajas y Gelvez (2019) en 25 depresiones cerradas en el que se señala que las dolinas se han desarrollado con direcciones preferenciales 115° y 50° , con una dirección secundaria 165° . La variación en las orientaciones es debida a la diferencia en el número de depresiones y el área cubierta en cada trabajo.

A partir de las orientaciones de los pasajes de cuevas, cavernas y grutas propuesta por Barajas y Gelvez (2019), junto con los datos recolectados en el presente trabajo de diaclasas, venas y clivaje es posible establecer que las orientaciones principales de las cavidades kársticas están estrechamente relacionadas con las direcciones principales de las fracturas, con una dirección 130° , concordante con las de diaclasas y venas. De la misma forma se puede observar una tendencia perpendicular 40° , correspondiente a la orientación preferencial de los planos de clivaje, estratificación, ejes de pliegues y la orientación secundaria de los planos de diaclasas en la zona de trabajo.

El tensor calculado en detalle (número de datos) en este trabajo (127°) es comparable con los tensores más regionales hallados por Gómez *et al.* (2008) 142° , Barajas y Gelvez (2019) 136° y García *et al* (2022) 118° que presentan la misma tendencia NW-SE. No obstante, la variación del ángulo de la dirección entre el tensor determinado y los tensores mencionados se asocia a la mayor precisión lograda en el cálculo del nuevo tensor, puesto que se determinó a partir de la inversión de los planos de diaclasas, venas, clivaje y planos estriados medidos en campo, mientras que los tensores anteriores fueron determinados con base en estructuras regionales y las orientaciones de las cavidades kársticas.

Por medio de los hidrogramas obtenidos de la quebrada saliente de la cueva Las Sardinas se establece que la hidrodinámica del sistema kárstico presenta una rápida respuesta ante los eventos de precipitación. Por otra parte, a partir de la constante de recesión obtenida de la curva maestra de recesión se hace evidente la sensibilidad y dependencia del cauce a la precipitación, puesto que al tener un tiempo de vida media de 12.5 días es posible que al presentarse prolongadas épocas secas los niveles del cauce se reduzcan y se incrementen solo cuando se presenten nuevos eventos de lluvia. El flujo base estimado más confiable es el obtenido por medio del algoritmo de Nathan y McMahon Paso 1 de 52.91%, puesto que, Aparicio (1992) sugiere que en la separación del flujo a través de métodos gráficos se subestima la fracción de flujo base, como se evidenció en el valor promedio estimado por el método de la línea recta (38,25%).

Los parámetros fisicoquímicos medidos en campo coinciden con algunos de los lugares medidos en Lasso *et al.* (2019). No obstante, hay diferencias en los valores de las mediciones que se deben a que se tomaron en épocas distintas del año, lo cual conduce a diferencias significativas en los valores de precipitación, por lo tanto, no es posible realizar una comparación entre los trabajos. Sin embargo, futuras mediciones en las mismas épocas del año se podrán contrastar los hallados en este trabajo con los suyos.

Los valores de conductividad eléctrica obtenidos son bajos en comparación con los normales para el agua subterránea en contacto con rocas carbonatadas, que de acuerdo con Cronin & Deakin (2000) está entre 500-700 ($\mu\text{s}/\text{cm}$). En consecuencia, se puede afirmar que el agua subterránea del sistema kárstico de El Peñón presenta baja mineralización soportando la rápida respuesta hidrodinámica que impide que haya suficiente tiempo para que ocurra una mayor influencia de la disolución de las rocas carbonatadas que daría como resultado una mayor mineralización del agua.

7. Conclusiones

El tensor de esfuerzos obtenido a partir del procesamiento de los datos medidos en campo tiene una orientación NW-SE (127°), a partir de la cual se explica la presencia de las estructuras de deformación tanto en frágil como dúctil, evidenciado en las orientaciones paralelas y subparalelas de los planos fracturas abiertas (diaclasas y venas) y perpendiculares a subperpendiculares de los ejes de pliegues y el clivaje en la zona de estudio.

Por medio del análisis de los planos de diaclasas se determinó 110° - 140° como la orientación preferencial de la deformación frágil de la zona de estudio y como secundarias 30° - 40° . Los planos de clivaje presentan una orientación 30° - 50° y las venas una orientación preferencial 120° - 140° . Finalmente, los planos de estratificación presentan una tendencia principal 30° - 40° y una orientación secundaria 110° - 120° .

A partir de la cartografía de las depresiones cerradas se establece que la orientación de sus ejes mayores se encuentra controlada por la dirección de los plegamientos y sistemas de fractura (diaclasas y clivaje) como es evidente en la formas elípticas y alargadas que adquieren estas geoformas con una orientación preferencial 30° - 50° y 110° - 140° .

La cuantificación de los patrones de fractura por medio de FracPaQ permitió establecer que las fracturas son pequeñas a muy pequeñas, la intensidad de fracturamiento es media y una densidad predominantemente baja. En la zona de estudio existen redes de menor conectividad hacia el sector occidental y redes de mayor conectividad hacia el sector oriental.

Existe una estrecha relación entre las direcciones de las cavidades kársticas y orientaciones principales de las fracturas evidenciadas en la zona, puesto que se encuentra una dirección NW-SE (130°), concordante con la de diaclasas y venas. De la misma forma, se puede observar una tendencia perpendicular NE-SW (40°), correspondiente a la orientación preferencial de los planos

de clivaje, estratificación y ejes de pliegues en la zona de trabajo lo cual es un indicador de que los patrones de fracturamiento controlan y favorecen la formación y crecimiento de las cavidades kársticas en el área de estudio.

Por medio de la orientación del tensor de esfuerzo se estableció que la dirección potencial del flujo del agua subterránea en el sistema kárstico de El Peñón es 120° - 130° , a través de las fracturas abiertas y una posible dirección secundaria coincidente con los planos de clivaje y la estratificación 30° - 40° .

La respuesta hidrodinámica del sistema en la salida de la cueva Las Sardinas es rápida (6 horas) ante los eventos de precipitación registrados en la estación de Bolívar y El Peñón, lo cual indica que el sistema kárstico se encuentra bien desarrollado. Se concluye que se genera una respuesta ante eventos de precipitación registrados en la estación de El Peñón solo cuando estos sobrepasan los 5 milímetros.

En relación con los parámetros fisicoquímico se estableció que los valores de temperatura muestran la temperatura ambiente de la zona. El pH se mantiene neutro a ligeramente básico acorde al sistema carbonatado y los valores medios a bajos de conductividad eléctrica soportan el buen desarrollo del sistema kárstico.

8. Recomendaciones

Se recomienda detallar la estratigrafía de la Formación Rosa Blanca que permita diferenciar los miembros de la unidad, dado que existen suficientes afloramientos a lo largo en la zona de estudio que permiten llevar a cabo este estudio.

Obtener la profundidad de las depresiones cerradas con el objetivo de determinar la relación profundidad/ancho, para así diferenciar las dolinas por origen de colapso y de disolución.

Analizar el comportamiento hidrodinámico en el mismo punto de estudio durante un mayor periodo de tiempo. Así mismo, se recomienda ampliar el estudio hidrodinámico a las demás cuencas hidrográficas de la zona, tal que permita un análisis espacial del comportamiento hidrodinámico del sistema kárstico de El Peñón.

Realizar adquisición de datos con métodos geofísicos enfocados en la identificación cavidades y canales de flujo en el subsuelo.

Realizar una caracterización geomorfológica detallada para así tener un inventario completo de las expresiones endokarsticas y exokarsticas de la zona de estudio.

Referencias Bibliográficas

- Andreu, J., Calaforra, J., Cañaveras, J., Cuezvas, S., Durán, J., Policarp, G., García del Cura, M., García, A., Gázquez, F., Ordóñez, S y Sánchez, S (2016). Karst: un concepto muy diverso. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, Vol. 24, Núm. 1, p. 6-20.
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, (Editorial Limusa).
- Auzmendi, A (1988). Estudio de acuíferos kársticos a partir de sus respuestas naturales. Aplicación a dos sistemas del País Vasco. *Revista Sociedad Geológica de España*.
- Bakalowicz, M. (2005). Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeol J* 13, 148–160 <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9>.
- Barajas, D y Gelvez, J. (2019). *Geoespeleología y Geoturismo en Cavernas de El Peñón (Santander): Conocimiento y alternativas para la Geoconservación de Sistemas Kársticos*. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Barton, N. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: International Society for Rock Mechanics. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.* 15. 319-368.
- Basso, A., Bruno, E., Parise, M & Pepe, M. (2013). Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy). *Environ Earth Sci* 70, 2545–2559 <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2297-z>
- Bögli, A. (1980). *Karst hydrology and physical speleology*. Springer.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., & Saldarriaga, J. G. (1994). *Hidrología aplicada* (No. 551.48 C4H5).
- Cronin, C & Deakin, J. (2000). An assessment of groundwater quality in county Clare. Groundwater Section of the Geological Survey of Ireland.

- Davis, G., Reynolds, S & Kluth, C. (2011). Structural geology of rocks and regions. John Wiley y Sons.
- Delvaux, D & Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion concerning tensor program. Geological Society, London, Special Publications. 212. 75-100. 10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06.
- Fernández, E., Herrero, N., Lari, Ortiz, I., Peiro-Pastor, J & Rossi, C (1995). Introducción a la geología kárstica. Federación Española de Espeleología.
- Ford, D & Williams, P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley, Chichester, 562. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>.
- Fossen, H. (2010). Structural geology. Cambridge university press.
- Garcia, H., Velandia, F., Bermudez, M & Audemard, F. (2022). The present-day tectonic regimes of the Colombian Andes and the role of slab geometry in intraplate seismicity. International Journal of Earth Sciences (2022) 111:2081–2099 <https://doi.org/10.1007/s00531-022-02227-9>
- Gilli, E. (2015). Karstology. Karsts, Caves and Springs. Elements of Fundamental and Applied Karstology. 10.1201/b18380.
- Gómez, D y Gómez, L. (2012). Separación de Flujo Base en la Cuenca del Río de Oro en la Estación Conquistador Alto Mediante la Programación de Algoritmos de No Linealidad (Trabajo de Investigación de Pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
- Gómez, L., Lancheros, J., López, C., Patiño, A., Beltrán, A., Renzoni, G., Guerra, A., y Quintero, C. (2008). Cartografía geológica y muestreo geoquímico escala 1:100.000 de la plancha 150, Cimitarra. Valle Medio del Magdalena. INGEOMINAS.

- Gutiérrez, M. (2008). Geomorfología. Pearson educación S. A. Madrid.
- Healy, D., Rizzo, R., Cornwell, D., Farrell, N., Watkins, H., Gomez, R., Timms, N & Smith, M (2017). FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns. *Journal of Structural Geology*, 95, 1-16.
- Hudleston, P & Treagus, S. (2010). Information from folds: A review, *Journal of Structural Geology*, Volume 32, Issue 12.
- Jones, W & White, W. (2019). Chapter 72 - Karst. *Encyclopedia of Caves (Third Edition)*. Pages 609-618.
- Julivert, M. (1968). *Léxico Estratigráfico Internacional*. Unión Internationale Des Sciences Géologiques. París. 415 pgs.
- Lasso, C., Benavides, A., Martínez, C., Fernández., J y Barriga, J. (2019). Área de estudio: Municipio de El Peñón (Andes) Santander, Colombia. Biodiversidad subterránea y epigea de los sistemas cársticos de El Peñón (Andes), Santander, Colombia.
- Lasso, C., Barriga y Fernández, J - Auderset (Eds.). 2019. Volumen VII. Biodiversidad subterránea y epigea de los sistemas cársticos de El Peñón (Andes), Santander, Colombia. Serie Editorial Fauna Silvestre Neotropical. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia.
- Llanos, H y Garfias, J. (2006). Análisis de series temporales de las descargas de los manantiales de acuíferos cársticos del País Vasco. *Ingeniería hidráulica en México*, vol. XXI, núm. 4, pp. 17-31.
- Mabee, S., Hardcastle, K & Wise, D. (1994). A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies. *Groundwater*, 32(6), 884-894.

- Mantilla, L., Cruz, L y Colegial, J. (2003). Introducción a la geología del sector Vélez–Bolívar–Guavatá (dpto. de santander, colombia) y su importancia para la exploración de depósitos hidrotermales. *Boletín De Geología*, 25(40), 39–57.
- Martínez, J. (2002). Geología estructural y dinámica global. Departamento De Geología, Universidad De Salamanca, Curso.
- Mendoza, H y Aguilar, J. (2019). Vegetación y Flora asociados a los ecosistemas exokársticos de El Peñón (Andes) Santander, Colombia. Biodiversidad subterránea y epigea de los sistemas cársticos de El Peñón (Andes), Santander, Colombia.
- Moreno, G. y Garcia, O (2006). Caracterización cuantitativa de patrones de fracturamiento mediante ventanas circulares y análisis fractal *Geología Colombiana*, 31(0), 73-90. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31931>).
- Paiva, I & Cunha, L. (2020). Characterization of the hydrodynamic functioning of the Degraças-Sicó Karst Aquifer, Portugal. *Hydrogeol J* 28, 2613–2629. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02201-2>.
- Pérez, A. (1969). Métodos para elaborar curvas de calibración en cauces aluviales. IDEAM.
- Pulido, A. (2014). Principios de hidrogeología kárstica. Editorial Universidad de Almería, 409 pp.
- Quinif, Y & Vandycke, S. (2001). Karst and Tectonics - Preface, *Geologica Belgica* [En ligne], number 3-4 - volume 4, 171-173 URL: <https://popups.uliege.be/1374-8505/index.php?id=1980>.
- Radulovic, M. (2013). A new view on karst genesis. *Carbonates and Evaporites*. 28. 10.1007/s13146-012-0125-2.
- Rodríguez, M y Escalante, E. (2008). Hidrogeología básica. Las aguas subterráneas y su flujo.

- Rodríguez, J y Lasso, C. (2019). Geología e Hidroquímica de las cuevas y cavernas de El Peñón (Andes) Santander, Colombia. Biodiversidad subterránea y epigea de los sistemas cársticos de El Peñón (Andes), Santander, Colombia.
- Rossello, E. (2010). Curso de Geología Estructural, material didáctico. CONICET, Universidad de Buenos Aires.
- Sağır, Kurtulus & Razack (2019). Hydrodynamic Characterization of Mugla Karst Aquifer Using Correlation and Spectral Analyses on the Rainfall and Springs Water-Level Time Series. *Water*. 12. 10.3390/w12010085.
- Shanov, S & Kostov, K. (2015). Dynamic Tectonics and Karst. 10.1007/978-3-662-43992-0.
- Shengjia, H & Lu, J. (2016). Contribution of baseflow nitrate export to non-point source pollution. *Science China Earth Sciences*. 59. 10.1007/s11430-016-5329-1.
- Singhal, B & Gupta, R. (2010). Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. 10.1007/978-90-481-8799-7.
- Ulloa, C y Rodríguez, E. (1978). Mapa geológico preliminar, plancha 170 Vélez, Informe 1790, Ingeominas, Bogotá.
- USDA. (1989). Hydrology Training Series. Module 107 – Hydrographs study Guide.
- Van Der Pluijm, B & Marshak, S. (2004). Earth Structure: An Introduction to Structural Geology 7and Tectonics. 2nd Edition, WW Norton, New York.
- Vélez, M. (1999). Hidráulica de Aguas Subterráneas. Universidad Nacional de Colombia.
- Željka, B., Mladen, K & Tamara, H. (2018). Groundwater flow mechanism in the well-developed karst aquifer system in the western Croatia: Insights from spring discharge and water isotopes. *CATENA*. Volume161.Pages14-26.

Zeeb, C.,1 Gomez-Rivas, E., Bons, P & Blum, P. (2013). Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrops. AAPG Bulletin, V. 97, No. 9. DOI:10.1306/02131312042.