

Geoespeleología y Geoturismo en Cavernas de El Peñón (Santander): Conocimiento y
alternativas para la Geoconservación de Sistemas Kársticos

Daniel Sebastián Barajas Rangel, Jorge Enrique Gelvez Chaparro

Trabajo de Grado para Optar al título de Geólogo

Director

Carlos Alberto Ríos Reyes

Geólogo MsC PhD

Codirector

Germán David Patarroyo

Geólogo MsC

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Especiales agradecimientos al Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA) y a su director Carlos Alberto Ríos Reyes por el soporte y acompañamiento en el desarrollo de este proyecto de investigación. Al profesor Francisco Velandia quien fuera el primer Espeleólogo de la Universidad Industrial de Santander. Al Semillero de Investigación del Patrimonio Geológico y su Grupo de Geoespeleología por el acompañamiento en la formación en Ciencias del Karst y su valentía para explorar los últimos lugares de la Tierra por descubrir. Al Decanato de la Facultad de Ingenierías Físicoquímicas por el apoyo financiero para el desarrollo de este trabajo. Al docente rural y Peñonero Ferney Vásquez Quiroga por su amistad y acompañamiento en las exploraciones subterráneas.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	19
1. Objetivos	21
1.1 Objetivo General	21
1.2 Objetivos Específicos.....	21
2. Localización	21
2.1 Localización geográfica	21
2.2 Meteorología	22
3. Marco Geológico	23
3.1 Fisiografía	23
3.2 Marco Estratigráfico	24
3.3 Marco Tectónico	28
3.3.1 Fallas	30
3.3.2 Pliegues	31
4. Marco Teórico.....	33
4.1 Karst.....	33
4.1.1 Exokarst y Zona Vadosa	38
4.1.2 Endokarst	45
4.2 Patrimonio Geológico	55
4.2.1 Definiciones	58
4.2.2 Geoturismo.....	60
4.2.3 Geoeducación.....	63

4.2.4 Geoconservación.....	63
5. Metodología	67
5.1 Primera Fase: Precampo	67
5.2 Segunda Fase: Reconocimiento y campañas de campo.....	68
5.3 Tercera Fase: Laboratorio.....	69
5.4 Cuarta Fase: Procesamiento e interpretación de datos.....	70
5.5 Quinta Fase: Elaboración del informe final	74
6. Resultados	74
6.1 Geología.....	74
6.1.1 Geología Estructural	80
6.2 Patrimonio Geológico	85
6.2.1 LIG 1: “Cañón de Panamá”	87
6.2.2 LIG 2: Galería Inferior Caverna Los Carracos	89
6.2.3 LIG 3: Cueva del Oro	99
6.2.4 LIG 4: Caverna La Tronera.....	105
6.2.5 LIG 5: “La ciudad del karst (Karst Town)”	109
6.2.6 LIG 6: Cueva Casa de la Virgen	110
6.3 Geoconservación.....	112
6.4 Análisis Mineralógico.....	113
6.4.1 Calcita	114
6.4.2 Aragonito	115
6.4.3 Siderita-Magnesita.....	116
6.4.4 Micrita y detritos.....	116
6.4.5 Yeso	117

6.4.6 Calcedonia.....	117
6.4.7 Introducción Ontogénica.....	119
7. Discusión.....	119
8. Conclusiones	121
Referencias Bibliográficas	123

Lista de Tablas

Tabla 1.	Reacciones de disolución y solubilidades de algunos minerales representativos que se disuelven congruentemente en agua, a 25°C y 1 bar de presión. Tomado de Ford y Williams, 2007.	35
Tabla 2.	Tipos de dolinas a partir de los procesos que las forman. Adaptado de Gilli, 2015.	42
Tabla 3.	Diferentes Clasificaciones de las Cuevas de disolución. Adaptado de Ford y Williams (2007).	48
Tabla 4.	Jerarquía de la ontogenia mineral. Tomado de Hill y Self, 2005.	54
Tabla 5.	Indice de Sensibilidad de Cuevas (CSI). Adaptado de Harley et al., 2011.	72
Tabla 6.	Clasificaciones de sensibilidad. Adaptado de Harley et al., 2011.	73
Tabla 7.	Geotopos identificados y valores calculados para cada uno.	85

Lista de Figuras

Figura 1. Mapas de localización geográfica y geológica de El Peñón (Santander) y sus áreas aledañas. Tomado de Gómez et al., 2008.	22
Figura 2. Partes de la Geoespeleología. Adaptado de Llopis (1970).....	34
Figura 3. Zonas de disolución y precipitación en un sistema kárstico con desarrollo subterráneo. Tomado y adaptado de Fairchild et al., 2012.....	36
Figura 4. A) Las dolinas de solución son una expresión topográfica de sitios con drenaje centrípeto a través del epikarst. B) Bajo la superficie el nivel freático subcutáneo marca la superficie superior del acuífero epikárstico y es manejado hacia abajo sobre las principales vías de fuga desarrolladas en las fracturas principales. C) El drenaje del epikarst está enfocado en zonas de alta conductividad hidráulica. Tomado y adaptado de Williams, 1985.	41
Figura 5. Estructura y formas comunes de dolinas. Tomado de Gilli, 2015.....	42
Figura 6. Principales geoformas exokársticas. Tomado y adaptado de Llopis (1970).	45
Figura 7. Diagrama de flujo representando los conocimientos, problemas, materiales, instrumentos y/o servicios entre Geoconservación Básica, Geoconservación Aplicada y Aplicaciones Técnicas de la Geoconservación. Tomado y adaptado de Henriques et al., 2011. .	65
Figura 8. La geoconservación establece diversas relaciones con la sociedad, garantizando la educación y el avance científico en las áreas de las geociencias. La geoconservación permite la creación de riqueza en los territorios a través del Geoturismo. Tomado y adaptado de Rodrigues, 2009.....	66
Figura 9. Mapa geológico generado del área de estudio.....	75
Figura 10. A) pliegues en el clivaje B) Venas de Calcita C) Trazas de pirita y calcopirita.	76

Figura 11. A) Micrita Intraclástica. B) Biomicrarenita (conchas de bivalvos y equinodermos). C) Micrita Fosilifera (Equinodermo, conchas de bivalvo) D) Micrita Intraclástica.....	77
Figura 12. Karren asociado a la Formación Rosablanca. A) Megakarren de cerca de 6 metros de altura. B) Rillenkarrren C) Rinnenkarren D) Tritkarren E) Karren cave.	78
Figura 13. A) Dolina “bowl shaped” B) Meseta kárstica C) Gruta de cerca de 8 metros de desarrollo con presencia de brecha hidrotermal y desarrollo de espeleotemas cenitales con trazas de malaquita D) Surgencia kárstica en el abrigo rocoso “Cueva La Virgen” E) Campo de dolinas y lapiaces, notese la presencia de estos últimos bordeando las depresiones.	79
Figura 14. Modelo Digital de elevación con unidades geomorfológicas kársticas cartografiadas.	80
Figura 15. Orientación de los ejes mayores de las dolinas presentes en la zona.	81
Figura 16. Evidencias de neotectónica y paleosismos preservados en el endokarst.....	81
Figura 17. Análisis de los patrones de orientación de los pasajes de cavidades presentes en el área de estudio.....	82
Figura 18. Análisis estructural de las orientaciones preferenciales de los pasajes de grutas y cuevas presentes en el área de estudio.	83
Figura 19. Modelo Digital de Elevación con las estructuras locales y regionales, diagramas rosas de las fracturas locales y de la dirección de las cavidades generadas.....	85
Figura 20. Belleza paisajística del Cañón de Panamá. A) Pliegues notorios B) Cascada “las siete maravillas”. C) Cañón de Panamá a punto de ser cubierto totalmente por nubes.	87
Figura 21. Mirador Cerro de Panamá. A) Esquemmatización estructura plegada presente. B) Panorámica. C) Cascada las 7 maravillas. D) Cascada.....	88

Figura 22. Mapa geoespeleológico de la galería inferior de la Caverna Los Carracos. Adaptado de Hapka et al. (2013).	90
Figura 23. A) Propiedad de comportamiento de las helictitas en su crecimiento. Tomado y adaptado de Self y Hill (2003). B) Conjunto de Helictitas, C) Helictita en forma de mano o dedos, D) y E) Helictitas asociadas a Dripstone y Flowstone.	93
Figura 24. A) Conjunto de Cortinas, Estalagmitas y Estalactitas Formando Columns. B) Conjunto de Estalactitas, Pajillas de soda y coladas con coloraciones rojizas y pardas. C) Banderas junto con estalactitas y columnas. D) Estalactitas, Estalagmitas, Cortinas y columnas, estas últimas con presencia de coraloides.	95
Figura 25. Espeleotemas combinados. A) Proceso de generación de la repisa y continuación del crecimiento de espeleotemas sobre y a través de esta. B) Repisa asociada con estalactitas y cortinas. C) Dos niveles de repisa que indican diferentes alturas de sedimentación en el salón. D) Repisa asociada a estalactia con crecimiento de coladas.	96
Figura 26. A) Cabeza de Ducha B) Estalactita de calcita con pirolusita dendrítica precipitada sobre esta. C) Bañera compuesta de gours y microgours.	97
Figura 27. Espeleotemas de yeso. A-B) Flores de yeso. C) Esquema de las formas de crecimiento del yeso, tomado de White, 2017. D) Flor de yeso de menor tamaño. E) Espeleotemas parietales de yeso.	98
Figura 28. Entrada Cueva del Oro. A) Valle de dolinas que termina en la cueva. B) Dolina donde finaliza el valle, presenta una sima que por su predominio vertical y abundante vegetación ha impedido su exploración. C) Entrada a la cueva.	99
Figura 29. Mapa geoespeleológico preliminar de la Cueva del Oro.	100

Figura 30. A) Estalactitas y pajillas de soda en crecimiento activo. B) Pajilla de soda azul y helictitas creciendo a partir de estalactitas de calcita. C) Excentricas de aragonito.	101
Figura 31. A) Crecimiento de un flowstone junto a una estalactita, variación en los niveles entre siderita-Magnesita y Calcita. B) Cortinas combinadas con estalactitas y columnas. C) Combinacion de estalagmitas, estalactitas, cortinas, banderas y columnas.....	102
Figura 32. Formas endokársticas. A) Repisa asociada a una columna con crecimiento posterior sobre esta de estalagmitas y cortinas del techo. B) Piscinas constituidas por gours y microgours debido a una surgencia. C) Cabeza de Ducha con bañera asociada.....	103
Figura 33. Bioespeleologia en la cueva del oro. A) Orden Crustacea. B) Pisauridae (Araneae). C) Cranidae (Opilion).	104
Figura 34. Mapa geoespeleologico de la Caverna La Tronera. Modificado de Hapka et al. (2013).	105
Figura 35. Entrada de la Caverna La Tronera. A. Vista desde la entrada al exterior de la caverna, se puede observar la gran cantidad y tamaño de bloques angulares en el piso. B. Vista desde el exterior de la caverna.	106
Figura 36. Dolina de colapso “El Corazón del Mundo” A. Caída de cerca de 130 metros B. Forma de corazón de la sima. Los puntos en la parte inferior corresponden a personas.....	107
Figura 37. Quebrada subterránea en la caverna la Tronera.	108
Figura 38. Karst Town. A) Valle de dolinas alineado con el karren al fondo bordeando las depresiones. B) Megakarren de 6 m de altura. C) Belleza paisajística del lugar. D) Mesokarren.	110
Figura 39. Cueva Casa de la virgen. A) Escarpe donde se genera la gruta. B) Altar a la virgen dentro de la gruta. C) Surgencia de agua a un costado del escarpe. D) Vista desde la gruta.	111

Figura 40. Prácticas de Geoeducación en la biblioteca municipal. A) Jóvenes participantes del taller. B) Taller de fósiles. C) Taller de minerales. D) Taller de Geografía. E) Taller de formación de montañas. 113

Figura 41. A) Calcita Columnar recristalizando en variedad microcristalina, con superficies de erosión que contienen micrita y detritos (FlowStone). B) Calcita columnar acicular asociada a recristalización a partir de cristales de aragonito (FlowStone). C) Calcita columnar abierta y paralela recristalización en variedad microcristalina (Coraloide). D) Imagen SEM de un coraloide que muestra aun las caras de cristales columnares y convertida en calcita microcristalina..... 115

Figura 42. A) Aragonito parietal de la Caverna los Carracos. B) Espectro del Aragonito anterior, impurezas de Mg y Os. C) Aragonito Azul de la Cueva del Oro, notese las direcciones de crecimiento diferente en los dos niveles de crecimiento. 116

Figura 43. A) Cristales de Malaquita asociados a la alteración de la calcopirita. B) Espectro de la Malaquita. 117

Figura 44. A) Imagen SEM de la estalactita de los carracos, alteración (Silicificación) de la calcita en las caras dadas por la fábrica columnar. B) Coraloide del Oro, calcedonia y calcita. C) Imagen SEM de la estalactita de los carracos, silicificación del centro hacia afuera del cristal de calcita columnar microcristalina. D) Espectro en el centro de la alteración..... 118

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS)

Apéndice A. Formato de descripción y valoración del geotopo Cañón de Panamá.

Apéndice B. Formato de descripción y valoración del geotopo Galería Inferior Caverna Los Carracos.

Apéndice C. Formato de descripción y valoración del geotopo Cueva del Oro.

Apéndice D. Formato de descripción y valoración del geotopo Caverna La Tronera.

Apéndice E. Formato de descripción y valoración del geotopo Ciudad del Karst.

Apéndice F. Formato de descripción y valoración del geotopo Cueva Casa de La Virgen.

Resumen

Título: Geoespeleología y Geoturismo en Cavernas de El Peñón (Santander): Conocimiento y alternativas para la Geoconservación de Sistemas Kársticos*

Autores: Daniel Barajas

Jorge Gelvez**

Palabras Clave: Geoespeleología, Geoturismo, Karst, Geoconservación.

Descripción:

Los sistemas kársticos ocupan una parte importante de la corteza continental alrededor del mundo y constituyen uno de los ambientes más vulnerables al cambio climático y a las actividades humanas. En Santander se han reportado la existencia de más de 100 cuevas asociadas a la Formación Rosablanca y Formación Tablazo principalmente. El municipio de El Peñón constituye un extenso e importante sistema kárstico, con una gran riqueza geológica, paisajística, arqueológica y subterránea. El desarrollo kárstico de la región está regido por el control tectónico de la zona evidenciado en las orientaciones preferenciales NW-SE y NE-SW que adquieren las unidades exo y endokársticas. El estado casi prístino de la gran mayoría de estas manifestaciones subterráneas permite su estudio para la contribución al planteamiento de alternativas que vean este patrimonio como un recurso con gran potencial para aportarle al desarrollo sostenible de los territorios rurales. En este trabajo de investigación se identifican y valoran 6 potenciales geotopos en cercanías al municipio de El Peñón. Todos los geotopos presentan valores medios en los intereses científico, didáctico y turístico, a excepción de la galería inferior de la Caverna Los Carracos que arroja un alto valor científico. En la galería inferior de la Caverna Los Carracos y la Cueva del Oro se lleva a cabo un estudio mineralógico de la gran variedad de espeleotemas presentes en estas, predominando los carbonatos, sulfatos y óxidos, trazas encontradas en el Oro se asocian con aportes de Cobre, evidenciado en malaquita producto de la alteración de la calcopirita, relacionando las características ontogénicas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Ríos Reyes, Geólogo PhD

Abstract

Title: Geospeleology and Geotourism in Caverns of El Peñón (Santander): Knowledge and alternative for the Geoconservation of Karstic Systems*

Author: Daniel Barajas

Jorge Gelvez**

Keywords: Geoespeleología, Geoturismo, Karst, Geoconservación.

Description:

Karst systems occupy an important part of the continental crust around the world and constitutes one of the most vulnerable environments to climate change and human activities. In Santander has been reported the existence of more than 100 caves associated with the Rosablanca and Tablazo Formation. The municipality of El Peñón is an extensive and important karst system, and too a great geological, landscape, archaeological and underground wealth. Karstic development of the regions is controlled by the local and regional tectonic of the area evidenced in the preferential orientations NW-SE and NE-SW in the exo and endokarstics units. Pristinity of the majority the subterranean manifestations allow it's study for the contribution to the approach of alternatives for the karstic potential, being a resource with great potential to contribute to the sustainable development of the rural territories. In this research, 6 geotopos potential are identified and valued near to municipality of El Peñón. All valued geotopos present average values in scientific, didactic and tourist interests, the lower gallery of the Los Carracos Cavern is the exception, which has a high scientific value. In the lower gallery of the Los Carracos Caverns and the Golden Cave a mineralogical study is carried out of the great variety of speleothems presents, predominating carbonates, sulphates, and oxides, the traces found in the Golden Cave are associated with contributions of zinc or copper, the latter has been evidenced within the cave in malachite product of the chalcopyrite alteration. The different textures and compositions lead to give individual ontogenic characteristics that could be related to each other.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physico-chemical Engineering. School of Geology. Director: Carlos Ríos Reyes, Geologist PhD

Introducción

La pacificación de gran parte de nuestro territorio nacional ha sacado a la luz maravillosos paisajes escondidos que por décadas se mantuvieron ocultos por las prácticas violentas que proliferaban en los territorios rurales. Hoy estas regiones necesitan practicas alternativas que contribuyan a su desarrollo sostenible, y el patrimonio natural con el que cuentan tiene un alto potencial para ser aprovechado y a su vez de generar identidad, la cual puede ser una herramienta valiosa para lograr la cohesión social en sociedades disgregadas y poco equitativas como la nuestra.

El municipio de El Peñón (Santander) es un área bastante conocida gracias principalmente a las expediciones de sociedades espeleológicas nacionales e internacionales que han dejado ver la gran riqueza kárstica con la que cuenta este territorio al sur de Santander. Esto ha traído consigo grandes descubrimientos en cuevas (yacimientos arqueológicos, yacimientos paleontológicos, entre otros) que han incentivado el desarrollo de investigaciones científicas sobre este patrimonio natural. A su vez, debido a la amplia exposición pública que ha tenido este territorio, en los últimos años también se han intensificado las prácticas de turismo sin la debida planificación que además de no aprovechar todo el potencial que ofrece este recurso, han causado la destrucción de parte de este patrimonio único e irrecuperable.

El estudio científico del patrimonio natural superficial y subterráneo encontrado en el municipio de El Peñón (Santander), y su inventario contribuirá a entender el Patrimonio Geológico como un recurso más del territorio y plantear estrategias como el Geoturismo que logren aportar al desarrollo sostenible de la región promoviendo a su vez la preservación y

conservación del patrimonio natural presente en el territorio. Para llegar a estas soluciones es necesario desarrollar conocimiento y prácticas de Geoconservación (p.ej: Geoeducación) con la población aledaña que llevarán a la preservación de este recurso no renovable, y siempre teniendo presente que el Patrimonio Geológico es un recurso comunitario y hay que entenderlo como tal, impedir el acceso a un lugar no es la única ni mejor manera de garantizar la conservación de este irrecuperable patrimonio natural.

El desarrollo de esta investigación pretende contribuir al Inventario Nacional del Patrimonio Geológico que ha iniciado el Servicio Geológico Colombiano en este dominio de la Cordillera Oriental. El inventario, valoración y estudio de los primeros Lugares de Interés Geológico en cercanías del municipio de El Peñón, con la implementación de la Geoconservación en sus múltiples dimensiones puede llegar a ofrecer alternativas que contribuyan al desarrollo sostenible de este territorio.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Identificar, valorar y estudiar el Patrimonio Geológico (Mueble o Inmueble) presente en las inmediaciones del municipio de El Peñón (Santander).

1.2 Objetivos Específicos

Elaborar la Cartografía geológica y geomorfológica de la zona de trabajo a escala 1:15000.

Georreferenciar, describir y valorar los Lugares de Interés Geológico (LIG) identificados en la zona.

Elaborar Cartografía Geoespeleológica de la Cueva del Oro.

Caracterizar mineralógicamente muestras recolectadas en las cavernas estudiadas con una introducción a la ontogenia de los espeleotemas presentes.

Incentivar prácticas de Geoconservación en la zona que puedan garantizar la preservación del patrimonio identificado y su aprovechamiento sostenible.

2. Localización

2.1 Localización geográfica

El área de estudio del presente proyecto se encuentra localizada en el municipio de El Peñón, ubicado en las estribaciones occidentales de la Cordillera Oriental, en la Provincia de Vélez al sur oeste del departamento de Santander, a 261 kilómetros de la capital del departamento. La parte norte del municipio se encuentra mapeado en la plancha 150 Cimitarra del Servicio Geológico Colombiano, ubicado sobre la cuenca del Valle Medio del río Magdalena (VMM).

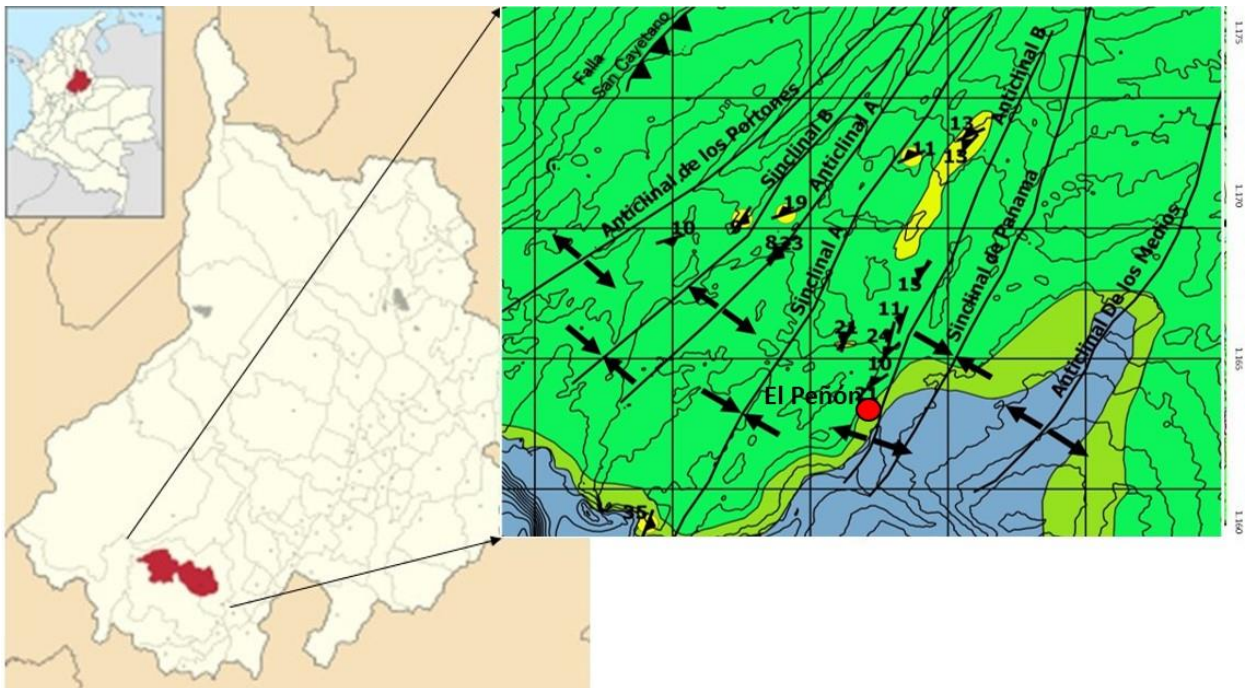


Figura 1. Mapas de localización geográfica y geológica de El Peñón (Santander) y sus áreas aledañas.

2.2 Meteorología

El municipio se encuentra a una altitud media de 2500 m.s.n.m. con una precipitación media anual de 1500 mm y una temperatura media de 16° C. La variación de temperatura y precipitación de esta zona está relacionada con el movimiento (norte-sur) de la Zona de

Convergencia Intertropical (ZCIT), con las corrientes convectivas provenientes del Caribe y Pacífico, y con los flujos de aire del Atlántico. Debido a los desplazamientos de la ZCIT esta área de los Andes presenta un ciclo bimodal de lluvias y sequía, con las mayores precipitaciones entre marzo-mayo y septiembre-noviembre (Ramírez, 2014).

En el área, Ramírez (2014) reconstruyó la paleopluviosidad en la zona para los últimos 5.300 años (Holoceno medio a tardío) a partir de dataciones radiométricas de U-Th y datos de isotopía de alta resolución de O y C en 3 estalagmitas de la Caverna Los Carracos que revelaron grandes cambios marcados que ha presentado el clima en la zona y la ZCIT durante los últimos 5 milenios relacionándose con fenómenos climáticos de escala global como la Pequeña Edad de Hielo (s. XV- s. XIX) y la Anomalía Climática Global (s. X- s. XIV) que dejaron importantes consecuencias en las poblaciones de estas épocas.

3. Marco Geológico

3.1 Fisiografía

Las cavernas y cuevas se encuentran entre los 1100 msnm (Cueva de los Osos, La Hermosura) y 2600 msnm (Los Carracos, El peñón), asociadas a una matriz de ecosistemas conformada principalmente por bosques secundarios, cultivos, pastos, potreros y en menor medida por parches muy reducidos de bosques andinos relativamente bien conservados. En la entrada de estas hay dos grupos de plantas que corresponden a especies dispersadas por guácharos (*Steatornis caripensis*) y murciélagos (varias familias), que generalmente son árboles o arbustos de frutos carnosos y epífitas rupícolas (Campos et al., 2018). Las quebradas o ríos subterráneos

presentes son de aguas cristalinas (turbias en lluvias), frías ($T = 14,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, promedio); básicas ($\text{pH} = 8$, promedio); $\text{TDS} = 132 \text{ ppm}$ (promedio) y con conductividad muy elevada (235 u/cm , promedio) (Campos et al., 2018).

3.2 Marco Estratigráfico

Las litologías aflorantes en el área de estudio corresponden a unidades litoestratigráficas del Jurásico Superior a Cretácico Inferior que corresponden a la nomenclatura de la denominada cuenca Tablazo-Magdalena.

- **Formación Arcabuco:** Esta formación corresponde a la unidad estratigráfica más antigua de la zona, se ha correlacionado con la Formación Los Santos aflorante en la zona de la Mesa de los Santos asignándole una posición estratigráfica inmediata por debajo de la Formación Cumbre, el área tipo de la unidad es la Serranía de Arcabuco, en el río Pómecca entre Arcabuco y Moniquirá (Hubach, 1953, 1957 en Gómez et al., 2008), la sección tipo de la unidad es descrita como un conjunto de arenitas gruesas a finas de cuarzo, de color gris claro y en ocasiones de color rojizo, intercaladas por lodolitas también rojizas, de unos 800m de espesor (Hubach, 1953, 1957 en Gómez et al., 2008). En el área de interés, sus afloramientos están restringidos al W del municipio de El Peñón, en el área drenada por la quebrada Hoya de Panamá, reportando Gómez (1977) un espesor de 200 m en las quebradas Honduras y Guayabo. Más recientemente con la cartografía de Gómez et al (2008), se muestra a la Formación Arcabuco aflorando en el núcleo del Anticlinal de Los Medios donde solo están expuestos los 32 m de la parte superior, es una secuencia donde predominan las arenitas de cuarzo con feldespatos,

líticos e intraclastos, cuyos diferentes porcentajes las definen como líticas a lítico – feldespáticas, de grano fino, subredondeado, de color gris claro. En general las arenitas, con pirita y mica como accesorios, tienen buena selección, son grano soportadas, con cemento silíceo y algo bioturbadas. Su geometría es en capas planas y paralelas, a convergentes y cuniformes, gruesas a muy gruesas; la estratificación interna no es neta debido a la bioturbación presente. El contacto con la Formación Cumbre está marcado por una corta secuencia de arenitas de cuarzo de grano fino, glauconíticas, estratificadas en capas delgadas, cubiertas por arcillolitas blancas caoliníticas y por arenitas de cuarzo, finas, negras, con delgados intervalos con impresiones de conchas. La edad de esta sucesión se ha inferido entre el Jurásico Superior y el Cretácico inferior. La sucesión facial observada en la sección medida en el techo de la formación, señala un ambiente de plataforma dominado por depósitos continentales con un régimen de flujo de baja energía que disminuyen hacia arriba (Gomez et al., 2008).

- **Formación Cumbre:** su nombre ha sido propuesto por Renzoni y Ospina (1969) para una sucesión aflorante en Boyacá entre Arcabuco y Moniquirá, donde se han reportado fósiles de lamelibranquios, gasterópodos y vegetales; su edad se ha inferido como Valanginiano. Esta formación yace concordantemente sobre la Formación Arcabuco y aflora en la terminación periclinal del anticlinal de Portones o Los Medios hacia el sur de la plancha 150-Cimitarra, cerca al municipio de El Peñón donde ocupa una superficie limitada y relativamente cubierta. En el ámbito regional se observa un conjunto de espesor variable, compuesto por capas de arenitas de cuarzo, arcillolitas y lodolitas grises oscuras a negras (Gómez et al., 2008). Gómez et al (2008) reportan un espesor local para la formación de 20 m en el sector de la Bodega, en el cruce entre las vías que conducen a

Palo Blanco, La Hermosura y El Peñón. Basados en la sucesión facial observada en esta columna estratigráfica, los autores infirieron un ambiente de depósito marino desarrollado sobre una llanura costera aluvial. La geometría de las capas y el cemento calcáreo de las arenas corresponden a un ambiente intermareal (Gómez et al., 2008). Gómez (1977) reporta en cercanías al municipio de El Peñón algunos diques que cortan la formación en donde se encuentran drusas y cristales de cuarzo de hasta 12 cm de largo.

- **Formación Rosablanca:** Esta unidad fue propuesta por Wheeler en 1929 en un informe no publicado. Su nombre proviene del Cerro Rosa Blanca, la unidad aflora en el cañón del río Sogamoso desde el Puente del Tablazo 1,5km aguas arriba en la vía que conduce de Lebrija hacia San Vicente de Chucurí. Aunque Wheeler no designó la sección tipo, este lugar pertenece sin lugar a dudas a la localidad tipo con un espesor próximo de 425m (Morales, 1958; Gomez et al., 2008), suprayace concordantemente sobre la Formación Cumbre e infrayace también concordantemente la Formación Paja; en el sector de Mesas y Cuestas, se le asigna una edad desde el Hauteriviano al sur de la cuenca del Valle Medio del Magdalena hasta Barremiano en el norte de esta (Ward et al., 1973). La Formación Rosablanca, es oblicua respecto a las líneas isocronas; su edad sería Barremiano hacia el extremo N del Valle Medio, Hauteriviano en la región de la Mesa de Los Santos-San Gil y Valanginiano en Villa de Leiva (Julivert, 1968). A partir de análisis quimioestratigráficos (isotopos de C, O y Sr) y petrográficos en el sector de La Mesa de Los Santos y Zapatocha, Bedoya y Nomesqui (2013) determinaron una edad Valanginiano-Aptiano inferior para la Formación Rosablanca, registrando la ocurrencia de los eventos anóxicos oceánicos Weissert, Faraoni y Selli, y sugieren un ambiente de sedimentación asociado a una plataforma carbonatada epírica de poca profundidad

afectada por una fuerte subsidencia. Un estudio petrográfico y estratigráfico detallado de una sección de 318 m de potencia fue llevado a cabo en el cañón del río Sogamoso al W de la Mesa de Los Santos, esta sección constituida por una sedimentación calcárea predominante (micritas, calcarenitas, calciruditas) acompañado de aportes terrígenos que se hacen importantes sobre todo hacia la parte alta de la sucesión, permiten deducir que las condiciones de sedimentación no fueron constantes para esta formación (Zamarreño, 1963). En el área de interés aflora en los alrededores del municipio de El Peñón, en el núcleo del anticlinal de Los Medios, donde Gómez et al. (2008) levantaron una columna estratigráfica en un escarpe de 150 m donde reconocen 3 segmentos de base a techo: secuencia de 10 m de capas gruesas (0,40-0,60 m) con geometría de tipo ondulosa irregular de lodolitas calcáreas de color gris oscuro sin estructura interna aparente, seguido de una secuencia de 46 m de capas muy gruesas (hasta 6 m) de lodolitas calcáreas color gris oscuro con un bajo contenido de bivalvos intercaladas con capas medias de arcillolita color gris oscuro. El siguiente segmento se trata de una secuencia de capas gruesas (0,40-0,60) con geometría plano paralela y ondular de lodolitas y limolitas calcáreas, masivas, color gris oscuro, intercaladas con láminas de arcillolita color gris oscuro, seguidas por una secuencia de 25 m de capas muy gruesas (hasta 3 m) de lodolitas grises oscuras con laminación débilmente ondulosa, paralela, intercaladas con láminas delgadas a medias, planas y paralelas, de arenitas de cuarzo, con cemento calcáreo y de arcillolita color gris oscuro. El último segmento reportado se trata de una secuencia monótona y espesa de 88 m de capas gruesas a muy gruesas con geometría plano-paralela a ondulosa de lodolitas calcáreas (mudsotones), color gris oscuro, con espesores variables de 0,90 a 4 m, intercaladas con algunos estratos delgados a muy

gruesos de biomicrosparita (packstones), de arenitas de cuarzo y de arcillolita color gris oscuro.

En rocas de esta formación se han encontrado venas de 20 cm de cuarzo fibroso mineralizadas a veces, de calcopirita, asociada también a barita (Gómez, 1977) y venas de hasta 15 centímetros de espesor rellenas de malaquita y azurita mayoritariamente, con galena, barita, calcita; además de otras manifestaciones minerales como calcitas, esfaleritas, asfaltitas brechificadas, piritas y smithsonita formada por procesos kársticos (Mantilla-Figueroa et al., 2003). También se han reportado mineralizaciones secundarias dentro de dolinas al NE del municipio de El Peñón (Gómez, 1977).

3.3 Marco Tectónico

Gómez et al (2008) identifican dos provincias estructurales en esta región: una al oriente, denominada provincia cordillerana, cuyo límite occidental está marcado por el trazo principal de la falla de La Salina y comprende las estructuras de carácter regional más relevantes de este sector occidental de la Cordillera Oriental; y una segunda provincia vinculada con el cinturón de pliegues y cabalgamientos del piedemonte occidental de la Cordillera Oriental, la cual se ubica al oeste de la falla de La Salina. La provincia cordillerana se caracteriza por el desarrollo de grandes anticlinorios nucleados en basamento, limitados por fallas inversas de alto ángulo con vergencia variable este u oeste que implican el basamento. Se trata de una provincia dominada por tectónica de “piel gruesa”. El anticlinal más oriental es el de Cobardes, localizado en el bloque cabalgante del Sistema de Fallas de Landázuri. En la zona sur – central de la plancha 150 se observa la terminación norte del anticlinal de Los Medios, configurada por un pliegue

simétrico a gran escala con características semejantes al anticlinorio de Los Cobardes; los grandes anticlinorios se localizan regionalmente en el bloque cabalgante del sistema de fallas de la Salina – Landázuri y están dispuestos en-echelon, probablemente por la relación con el sistema de transferencia Cimitarra – Landázuri (Geosurvey, 2000). El levantamiento estructural de algunos de estos grandes sinclinales, entre ellos los de Vélez y De Armas, se asocia con un despegue desde el contacto basamento-cobertera Cretácea, cuya propagación a manera de una trayectoria escalonada, alcanza los horizontes arcillosos del Cretáceo Superior, y posteriormente la superficie. Son estructuras levemente asimétricas en rocas del Paleozoico-Jurásico, afectadas por fallas de alto ángulo en los flancos y superficies de despegue estructural en rocas del basamento. Estas estructuras corresponden a un sistema pre-Andino, posiblemente asociado a fallas normales, reactivadas durante la orogenia Andina. Como argumento esencial que soporta esta tesis, están las diferencias de espesor entre las secuencias del Cretáceo Inferior localizadas en el bloque yacente y en el bloque colgante de la falla de La Salina, las diferencias de espesor demuestran que fueron depositadas en un ámbito extensional (Gómez et al., 2008). La configuración actual del control estratigráfico ejercido por la falla de La Salina en su fase extensional es una característica propia de estructuras de inversión tectónica (Coletta et al., 1990).

Cerca al municipio de El Peñón se ha reportado en rocas calcáreas de la Formación Rosablanca la existencia de planos de anisotropía muy penetrativos que cortan a los planos de estratificación casi perpendicularmente (fuerte fisilidad), correspondientes a un tipo de foliación secundaria que ha sido denominada como “slaty cleavage” (Mantilla-Figueroa et al., 2003; Nolasco, 2004). Esta foliación tectónica fue estudiada en cercanías a los municipios de Vélez, Bolívar y Guavatá por Nolasco (2004) quien la asocia con los sectores de influencia de las Fallas

El Guamito y Jabonera, y a su vez con dataciones Ar-Ar identificó la ocurrencia de tres eventos hidrotermales en la zona (eoceno, eoceno medio, paleoceno tardío).

3.3.1 Fallas

3.3.1.1 Sistema de Fallas de La Salina (SFLS). Este sistema de fallas con rumbo regional SSW – NNE limita la provincia cordillerana de la provincia de piedemonte occidental de la Cordillera Oriental. Corresponde con un sistema de cabalgamientos regionales con vergencia occidental. Pone en contacto rocas del Cretáceo Superior - Paleógeno con rocas del Mioceno – Oligoceno registrando un salto estratigráfico cercano a los 300 m. La falla de La Salina es una estructura profunda, de alto ángulo, que involucra el basamento pre-Cretáceo. El carácter regional, la geometría de la falla y el control estratigráfico y estructural que ejerce sobre las secuencias que afecta, permiten clasificarla como una estructura “clave” en el desarrollo del margen occidental del rift mesozoico del norte de Colombia y en la configuración del borde occidental de la Cordillera Oriental. Su reactivación en el Cenozoico durante la orogenia andina está relacionada con la dirección del esfuerzo compresional, el cual no fue completamente perpendicular a estas antiguas estructuras sino oblicuo originando estructuras y reactivaciones de carácter transpresivo. Como evidencia de estas relaciones, se observan pliegues de segundo orden oblicuos a estas fallas principales (Gómez et al., 2008).

3.3.1.2 Sistema de Fallas de Landazuri (SFL). Este sistema con rumbo SSW-NNE es subparalelo al SFS, posee una vergencia occidental y salto estratigráfico de unos pocos cientos de metros. Es una estructura típica cordillerana que afecta las secuencias del Cretáceo. Son

cabalgamientos con marcados rasgos geomorfológicos en el drenaje y la topografía de la región. Limita en sus flancos occidentales importantes estructuras como el sinclinal de Vélez y el anticlinal de Los Medios (Gómez et al., 2008).

3.3.1.3 Falla de San Cayetano. Posee rumbo SSW – NNE subparalelo a los cabalgamientos anteriormente mencionados. Se trata de una estructura con poco desplazamiento vertical y una importante componente de rumbo con desplazamiento lateral izquierdo en rocas del Cretáceo inferior. Afecta directamente el anticlinal de Los Medios en el área norte cercana a su cabeceo, al oriente de la población de Landázuri implicando rocas de las formaciones Rosablanca, Paja, Tablazo y Simití. Probablemente se trata de una estructura heredada de una tectónica mesozoica por su alto ángulo (Gómez et al., 2008).

3.3.1.4 Falla del Río Horta. Presenta un rumbo NWW – SEE, subperpendicular a los sistemas de fallas mayores y un alto ángulo de buzamiento. Presenta una fuerte componente de rumbo con evidente desplazamiento lateral derecho en rocas cenozoicas de la provincia piemontina occidental de la Cordillera Oriental. El movimiento relativo a lo largo de FH origina una zona de cizalla oblicua – subperpendicular al tren estructural de la Cordillera Oriental (Gómez et al., 2008).

3.3.2 Pliegues

3.3.2.1 Anticlinorio de Los Cobardes (ALC). Estructura regional ubicada parcialmente en la zona sur oriental de la plancha 150 donde se aprecia el flanco occidental, la cresta y parte del

flanco oriental, en La Paz (Santander), el núcleo del anticlinorio en superficie está conformado por rocas calcáreas de la Formación Rosablanca. El flanco occidental se encuentra conformado por las formaciones Paja, Tablazo y Simití. El flanco oriental se encuentra afectado por la Falla de Suárez en el extremo sureste de la plancha. Se trata de una estructura abierta, de gran amplitud y longitud de onda, en general simétrica y con un bajo cabeceo hacia el SW (235°) de aproximadamente 4° en el área comprendida entre Chipatá, La Paz y La Aguada, Santander. Posee un rumbo estructural de $N55^\circ E$ coincidente con el tren estructural general de la Cordillera Oriental. Se presume que en el origen de este pliegue se encuentra implicado el basamento, de donde se deduce una influencia distintiva y característica de tectónica de piel gruesa que involucra el desarrollo mismo de la provincia cordillerana (Gómez et al., 2008).

3.3.2.2 Anticlinal de los Medios (ALM). Este pliegue se localiza en la zona sur – central de la plancha 150 en la región NW de la población de Vélez, Santander, el rumbo general de la estructura es $N25^\circ E$ con una ligera asimetría entre la inclinación de sus flancos, en el núcleo afloran las formaciones Arcabuco, Cumbre y Rosablanca del Cretáceo Inferior. Los flancos, donde se observan numerosos pliegues sobrepuestos, subparalelos y oblicuos, están configurados en las rocas de las formaciones Paja, Tablazo y Simití, y es en esta última secuencia donde estos pliegues se encuentran con mayor frecuencia. El anticlinal se encuentra afectado por la falla de San Cayetano, la cual es una estructura desplazamiento lateral izquierdo que afecta las secuencias del Cretáceo Inferior y cuyo trazo es subparalelo al eje del anticlinal. Al igual que el Anticlinal de Los Cobardes, se presume la implicación del basamento en el origen de este pliegue. En la región norte del valle del río Horta – Aguamiel, al sur de los corregimientos de Jordán Alto y Jordán Bajo, se encuentra la terminación norte de esta estructura, la cual presenta

un fuerte cabeceo hacia N30°E aproximadamente de 15°; de eje vertical, con gran amplitud y gran longitud de onda. Según el análisis de orientaciones de planos de buzamiento, fracturas y lineamientos geomorfológicos, la región comprendida entre los ALC y ALM presenta una dirección del esfuerzo principal compresivo aproximadamente de 150° (Gómez et al., 2008).

3.3.2.3 Sinclinorio de Vélez. Este sinclinorio separa los anticlinales de Los Cobardes y de Los Medios, se extiende desde el sur del municipio de Vélez hasta el norte del municipio de la Paz. Presenta variaciones en el rumbo, pero en general es NE, acorde con el tren estructural de la cordillera. Es un pliegue abierto con plano axial vertical, gran longitud de onda y amplitud, y un cabeceo de 2. 5° hacia N47,8°E (Gómez et al., 2008)

4. Marco Teórico

4.1 Karst

El término “Karst” es el nombre germanizado del área de Kras al norte de Trieste (Eslovenia), su paisaje se caracteriza por sus mesetas boscosas, compleja topografía (lapiaces, dolinas, profundos acantilados, sumideros, grandes surgencias, poljes, entre otras geoformas), las corrientes no son comunes, desaparecen abruptamente subterráneamente y hay gran cantidad de cuevas y depresiones; esta área es considerada como el “Karst Clásico”, también denominado Carso en italiano o la Causse en Francia y actualmente es un atractivo turístico bastante popular que recibe varios cientos de miles de visitantes al año para ver las grutas o el castillo de

Predjama (Llopis, 1970; Kranjc, 2011; Gilli & Fandel, 2015; Klimchouk, 2015). La Karstología o Espeleología (del griego espeleon=cueva, y logos=tratado) son las ciencias que tratan del estudio del Karst de manera holística, y dentro las Ciencias Geológicas tenemos a la Geoespeleología, que estudia la geología de los sistemas kársticos en todos sus aspectos (Fig. 2) (Llopis, 1970).



Figura 2. Partes de la Geoespeleología. Adaptado de Llopis (1970).

Los paisajes kársticos están presentes en cerca del 20% de la superficie de los continentes y sobre o cerca a ellos vive cerca de un cuarto de la población mundial, además cerca del 20-25% de la población mundial depende en gran medida o enteramente de las aguas subterráneas obtenidas de los sistemas kársticos, caracterizándose porque el proceso geomorfológico dominante es la disolución de la roca por el agua lo que causa grandes problemas ingenieriles en zonas urbanas (Ford y Williams, 2007; De Waele et al., 2009), por lo que la génesis y desarrollo de características superficiales y

subterráneas kársticas pueden comprenderse todos como procesos químicos (White, 2015). En su forma más elemental, la química del karst se describe en la figura 3 mediante las reacciones de los minerales más comunes en las rocas de disolución, estas reacciones describen la disolución de minerales comunes, las reacciones en sentido opuesto para la caliza y el yeso describen la precipitación de espeleotemas de calcita y yeso; la dolomita, con pocas excepciones, no precipita directamente de soluciones acuosas en el ambiente de la cueva (White, 2015).

“Probablemente sea justo decir que tanto la química de equilibrio como la cinética química de los minerales kársticos primarios, la calcita, el aragonito, la dolomita y el yeso son razonablemente bien entendidas a escala de laboratorio. Los asuntos están menos resueltos en la escala de campo” (White, 2015, p. 359).

Tabla 1.

Reacciones de disolución y solubilidades de algunos minerales representativos que se disuelven congruentemente en agua, a 25°C y 1 bar de presión. Tomado de Ford y Williams, 2007.

Mineral	Reacción de disolución	Solubilidad (mg L ⁻¹)	Abundancia en aguas (mg L ⁻¹)
Gibbsita	$\text{Al(OH)}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Al}^{3+} + 6\text{OH}^-$	0.001	Traza
Cuarzo	$\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$	12	1-12
Silice	$\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$	120	1-65
Amorfa			
Calcita	$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	400*	10-350
Dolomita	$\text{CaMg(CO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$	300*	10-300
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	2400	0-1500
Silvita	$\text{KCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}^+ + \text{Cl}^- + \text{H}^+ + \text{OH}^-$	264000	0-10000
Mirabilita	$\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ + \text{OH}^-$	280000	0-10000
Halita	$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{H}^+ + \text{OH}^-$	360000	0-10000

Nota: * $P_{\text{CO}_2} = 10^{-1}$ bar.

Los sistemas kársticos pueden ser divididos de manera general entre dos regiones con diferente funcionamiento geoquímico, representando el suelo y el epikarst superior una región de disolución dominada por procesos de disolución de carbonatos en contacto con aguas agresivas (con relativamente alta PCO_2), y bajo esta se encuentra la región de precipitación que es donde ocurre la supersaturación en carbonatos y la precipitación de espeleotemas inducido por la desgasificación de CO_2 de las aguas que descienden dentro las cuevas (Fairchild et al., 2012).

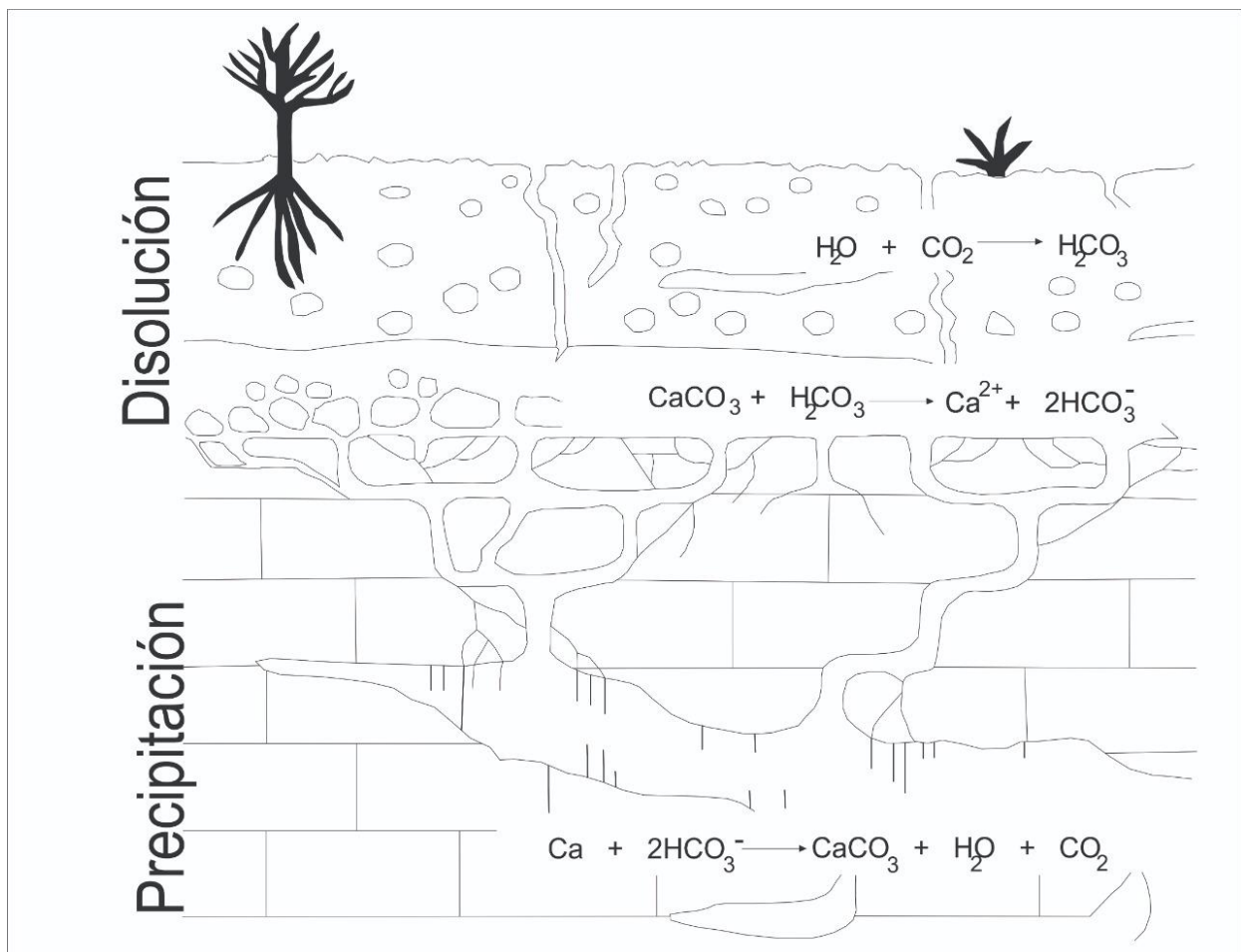


Figura 3. Zonas de disolución y precipitación en un sistema kárstico con desarrollo subterráneo. Tomado y adaptado de Fairchild et al., 2012.

La configuración tectónica-estructural se puede considerar el principal control sobre la karstificación en una zona, ya que es por las fracturas de la roca por donde se transportan las aguas acidas que generarán el desarrollo kárstico, pero la tectónica no solo restringe las direcciones principales de una red kárstica, sino que también induce límites mecánicos para la expansión kárstica (Quinif y Vandycke, 2001). Las cuevas guardan muy buenos registros de fenómenos geológicos como los sismos, los cuales modifican la morfología endokárstica y sus rellenos. Los terremotos pueden romper, derribar o desplazar espeleotemas; la geometría de esas modificaciones proporciona datos para estudios de sismotectónica (Quinif y Vandycke, 2001).

El fracturamiento neotectónico en regiones kársticas, especialmente en regiones de karst recientemente activo, es uno de los parámetros más importantes que controlan el movimiento del agua subterránea y el desarrollo de sistemas kársticos, de pasajes subterráneos de cuevas y pozos o cuevas verticales. En principio, los patrones más convenientes para el flujo del agua subterránea en macizos kársticos son las fracturas que están orientadas perpendicularmente al esfuerzo mínimo principal. Esas podrían ser fracturas de tensión en volúmenes de roca cercanos a la superficie, así como fracturas de cizalla, formadas bajo condiciones de un campo de esfuerzos más antiguo, pero que se encuentran perpendiculares a la comprensión mínima del campo de esfuerzos más joven. En tal caso, los pasajes subterráneos de cuevas con flujo de agua activo (canales de drenaje) deberían estar orientados perpendicularmente al eje σ_3 del campo de esfuerzos más joven, o en condiciones cercana a la superficie a lo largo de la dirección del σ_1 . Así, dado que la ruta de penetración del agua en los macizos kársticos que causa el fenómeno kárstico es controlada por la tectónica, es posible usar la ruta inversa y deducir el estilo de los movimientos tectónicos de las características del fenómeno kárstico (Shanov y Kostov, 2015).

En Colombia han sido reportadas cientos de cuevas, encontrándose los sistemas kársticos distribuidos en 21 departamentos (Muñoz-Saba et al., 1998) con la mayoría de las manifestaciones principalmente en la Cordillera Oriental, donde aisladas áreas kársticas contienen un número de cuevas significantes (Gunn, 2004). Este es el caso del departamento de Santander, donde Galvis-Gómez (2018) recopiló el registro de 218 geoformas kársticas georreferenciadas (92 cuevas, 72 dolinas y 24 hoyos, entre otras) demostrando el potencial karstificable en 57 municipios de los 87 que tiene el departamento.

4.1.1 Exokarst y Zona Vadosa: El exokarst se refiere a las características kársticas superficiales que se desarrollan en la superficie, la zona vadosa en el karst comprende el suelo (si lo hay), la zona del epikarst y la zona de transmisión. El Epikarst o zona subcutánea representa la zona más cercana a la superficie que puede estar expuesta o puede estar cubierta por suelo con espesor variable, en estas primeras decenas de metros el agua de lluvia tiene mayor poder disolvente y se caracteriza por ser una zona altamente meteorizada con alta porosidad secundaria (10-30%), por la presencia de múltiples fisuras que son ensanchadas por la corrosión cerca de la superficie y que se estrechan con la profundidad.

Desde el epikarst, el agua se infiltra rápidamente encontrando el flujo vertical de agua un aumento en la resistencia con la profundidad a medida que las fracturas se hacen más estrechas y menos frecuentes, esta zona presenta una alta capacidad de almacenamiento, una alta variabilidad en la distribución de espacios vacíos y una naturaleza espacialmente variable del flujo de agua, las cuales son características dentro del epikarst que lo distinguen del resto de la zona vadosa subyacente, la cual funciona principalmente como una zona de transmisión con mínimo almacenamiento; la comprensión del epikarst es derivado de la convergencia de ideas acerca de su función hidrológica, biológica y su rol geomorfológico (Williams, 2008; Gunn, 2004; Gilli, 2015).

En las regiones kársticas las rocas aflorantes son moldeadas por los agentes meteorizantes presentes en la zona generando geformas esculturales características de estos paisajes que pueden variar en su tamaño, desde pocos milímetros a decenas de metros, y que han sido denominadas colectivamente como karren, una versión anglificada de la vieja palabra alemana karren, el equivalente de los términos franceses lapieés y lapiaz. Estas formas disolucionales se desarrollan en varios tipos de rocas como basaltos, granitos, areniscas, esquistos, filitas, conglomerados calcíferos, pero principalmente en las rocas kársticas (caliza, dolomita, yeso, anhidrita, halita, mármol) y en su formación varios pueden ser los procesos disolucionales (p.ej: ácido, alcalino) y los factores condicionantes, entre estos últimos están los litológicos, estructurales, topográficos, pedológicos, meteorológicos y biológicos principalmente (Soriano, 1985; Gilli, 2015; Veress, 2019). De acuerdo a su tamaño, el karren puede ser nanokarren, con un ancho y profundidad de 1 mm, microkarren cuando estos parámetros no sobrepasan 1 centímetro, mesokarren cuando los tamaños varían de algunos centímetros a algunos metros, y megakarren para los mayores (Veress, 2019). De acuerdo a su origen, a pesar de que el karren es

casi siempre poligenético, puede ser clasificado de acuerdo al proceso solucional principal: por flujo de agua (rillenkarrren, rinnenkarrren, meanderkarrren, wandkarrren, trittkarrren, karrren caves, scallops, ripplekarrren, ausgleichsfläche, solution ripples), por filtración (grikekarrren, kamenitzas, pitkarrren, schichtfugenkarrren, napkarrren), por goteo (rainpits), por ácidos orgánicos (root karrren) y otros que presentan un complejo desarrollo (p.ej: spitzkarrren, karrren mounds, karrrennasen) (Veress, 2010; Veress, 2019). El estudio del karrren lleva a la comprensión de los procesos disoluciones importantes para el área kárstica en particular, su proceso de formación es un indicador de cambio en las condiciones ambientales de la zona, también puede ser usado para establecer el valor de denudación del suelo (Soriano, 1985; Gilli, 2015; Veress, 2010).

Las zonas donde se intersecan varias fisuras, generalmente diaclasas, son más favorables para la percolación, desarrollándose en estas los principales patrones de drenaje y fluyendo el agua en el acuífero epikarstico hacia estas, resultando en zonas con mayor disolución. La superficie piezométrica del acuífero epikárstico se desplaza hacia abajo sobre las principales vías de fuga producidas por los ejes desarrollados hacia abajo en la zona de intersección de las principales fracturas, un patrón similar al cono de depresión en el nivel freático sobre un pozo bombeado; las líneas de corriente se ajustan y el flujo resultante es centrípeto y convergente en la zona de drenaje. De esta manera, el flujo disolvente se enfoca y, a medida que la superficie disminuye, las zonas más intensamente corroídas comienzan a obtener la expresión topográfica como dolinas de solución (Figura 4) (Llopis, 1970; Gunn, 2004; Williams, 2008).

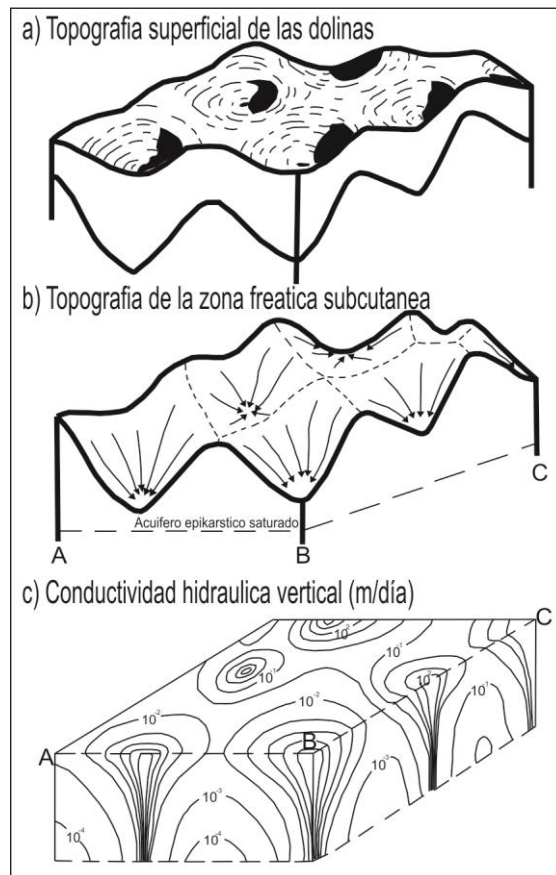


Figura 4. A) Las dolinas de solución son una expresión topográfica de sitios con drenaje centrípeto a través del epikarst. B) Bajo la superficie el nivel freático subcutáneo marca la superficie superior del acuífero epikárstico y es manejado hacia abajo sobre las principales vías de fuga desarrolladas en las fracturas principales. C) El drenaje del epikarst está enfocado en zonas de alta conductividad hidráulica. Tomado y adaptado de Williams, 1985.

Las dolinas existen en todas las zonas kársticas, son la forma de absorción fundamental del karst, y forman una multitud de pequeñas cuencas endorreicas que colectan el agua lluvia actuando como embudos naturales, su apariencia y tamaño pueden ser muy diversos dependiendo de múltiples factores (solubilidad de la litología, clima, tectónica de la zona, procesos pedogénicos, biológicos, entre otros), pequeñas dolinas se forman en las áreas con alta

frecuencia de fisuras, mientras las más grandes generalmente se desarrollan en donde hay un fracturamiento más ampliamente espaciado (Llopis, 1970; Gunn, 2004; Gilli, 2015).

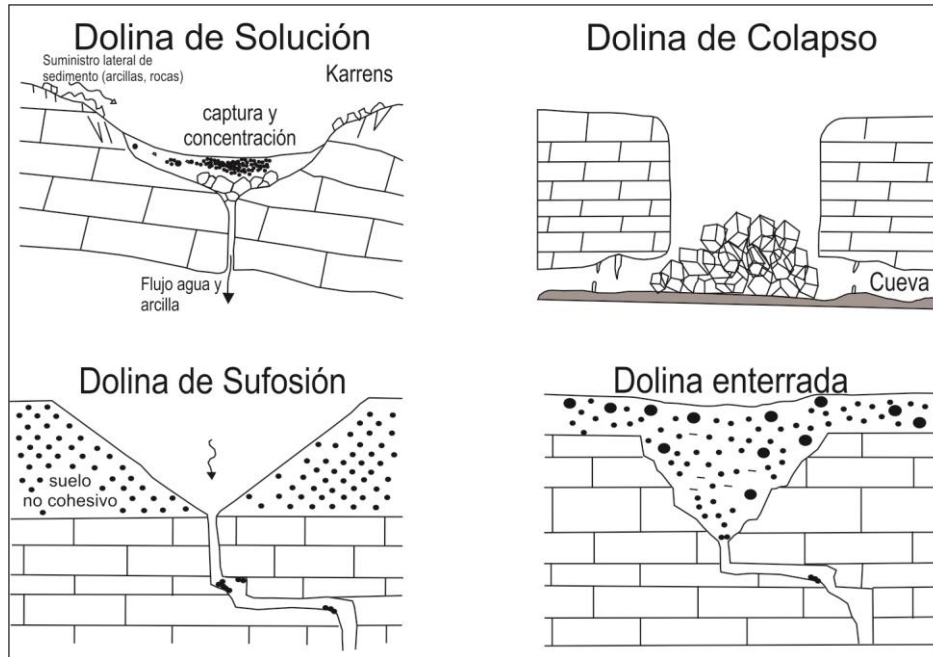


Figura 5. Estructura y formas comunes de dolinas. Tomado de Gilli, 2015.

“Es ampliamente aceptado que las depresiones encerradas en karst pueden ser formadas por cuatro principales mecanismos: disolución, colapso, sufusión y subsidencia regional. Sin embargo, en la práctica la complejidad de los procesos naturales casi siempre resulta en más de un mecanismo envuelto, en cuyos casos la dolina es de origen poli genético” (Gunn, 2004, p. 629).

Tabla 2.

Tipos de dolinas a partir de los procesos que las forman. Adaptado de Gilli, 2015.

Proceso	Geoforma producida	Términos usados para describirlo
<p>1.Disolución: Disolución química (Corrosión) de la roca.</p>	<p>Depresiones cerradas en forma de tazón, plato o embudo usualmente con una cubierta de suelo.</p>	<p>Dolina de Solución</p>
<p>2.Colapso: En capas no cosolidadas o de roca compacta, y puede progresar rápida o lentamente.</p>	<p>Depresiones cerradas cilíndricas a lados empinadas en rocas kársticas con el fondo lleno de escombros, a veces con paredes de roca escarpadas e incluso colgantes de decenas a</p>	<p></p>
<p>(i) Colapso repentino o progresivo del techo de una cueva dentro la caverna subyacente. El colapso es enteramente dentro de las rocas kársticas y puede propagarse hacia arriba de decenas a cientos de metros debajo de la superficie.</p>	<p>cientos de metros de altura. Algunos se abren cerca de su base en la cueva subyacente; algunos contienen lagos. Hasta unos pocos cientos de metros de diámetro, pero a menudo mucho menos.</p>	<p>Dolina de Colapso – Cenote de colapso (solo cuando este contiene un lago)</p>
<p>(ii) Colapso repentino o progresivo de roca de cubierta no kárstica dentro de una cueva infrayacente.</p>	<p>Depresiones cerradas cilíndricas a lados empinadas en rocas no kársticas con el fondo lleno de escombros, algunas veces, pero no siempre revelando la roca kárstica infrayacente.</p>	<p>Dolina de roca de cubierta</p>
<p>(iii) Falla repentina en sedimentos no consolidados que suprayacen una cavidad subsuperficial, dando lugar a una depresión en la superficie. Los sedimentos son evacuados hacia abajo</p>	<p>Depresiones cerradas de lados pronunciados (a veces cilíndricas cuando están recién formadas) en sedimentos de cobertura no consolidados. Tales depresiones se encuentran a menudo en el relleno de sedimentos cerca del fondo de una dolina de solución.</p>	<p>Dolina de colapso de cubierta</p>
<p>3.Sufosion y subsidencia: Subsidencia gradual de las capas superficiales (opuesto al colapso repentino) dando lugar a una depresión en la superficie.</p>	<p>Superficie con hoyos de depresiones cerradas, algunas veces exponiendo ventanas de la capa de roca infrayacente.</p>	<p>Dolina de Sufosión, especialmente en capas de cobertera de sedimentos finos. A veces, los sedimentos han enterrado completamente una dolina preexistente, cuya forma se está exhumando a medida que se produce el hundimiento.</p>
<p>4.Subsidencia Regional Este proceso involucra un asentamiento suave y progresivo de la superficie del suelo sobre grandes áreas como consecuencia de la disolución gradual de las capas profundas de evaporitas interstratificadas infrayacentes por parte de las aguas subterráneas.</p>	<p>Depresiones alineadas son formadas cuando las capas se están profundizando, pero, por lo demás, las depresiones suavemente inclinadas se distribuyen sobre una superficie ondulada. Las depresiones a menudo tienen una superficie de varios kilómetros cuadrados y, por lo tanto, son mucho más grandes de lo que generalmente se entiende por el término dolina. Sin embargo, algunas depresiones más pequeñas se forman de esta manera.</p>	<p>Depresión por subsidencia</p>

La evolución de las dolinas puede conducir a 2 formas diferentes de desarrollo: cuando predomina el desarrollo vertical en profundidad se conduce hacia formas abiertas como las simas, pero cuando las dolinas evolucionan en superficie más rápidamente que en profundidad, se llega a otras formas cerradas, siendo frecuente que los bordes de estas se conjuguen y originen una depresión más amplia conocida como úvala, que en lengua yugoslava significa valle (Llopis, 1970; Gunn, 2004). Las más grandes depresiones kársticas cerradas son los poljes, que pueden ser considerado el equivalente kárstico de los valles en un ambiente fluvial, caracterizados por tener fondos planos y formas en planta más o menos alargadas generalmente en el sentido de los accidentes tectónicos o lineamentos estructurales presentes en la zona, casi siempre se encuentran rodeados en todos los lados por pendientes empinadas y su relleno sedimentario es una mezcla de materiales alogénicos y autigenicos generalmente finos casi siempre llamados por facilidad terra rossa (Llopis, 1970; De Waele, 2009; Veress, 2016). De acuerdo a sus propiedades hidrológicas los poljes pueden ser clasificados en 3 tipos: (i) poljes secos, generalmente a mayores altitudes estando su fondo sobre el alto nivel freático kárstico (ii) poljes inundados intermitentemente, generalmente contienen lagos intermitentes, tienen un funcionamiento complejo ya que en periodos húmedos se inundan total o parcialmente y quedan secos durante las sequías (iii) poljes inundados permanentemente (Llopis, 1970; Veress, 2016).

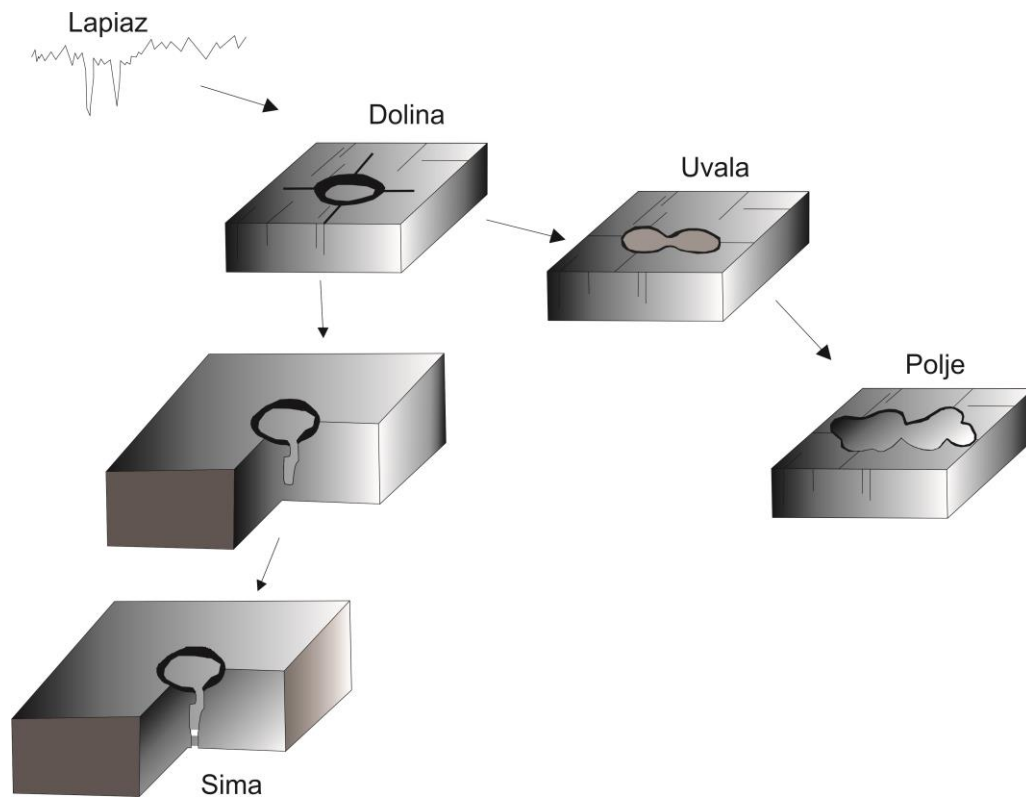


Figura 6. Principales geoformas exokársticas. Tomado y adaptado de Llopis (1970).

4.1.2 Endokarst : Toda clase de conductos subterráneos generados de forma natural sea cual sea su geometría o topografía es un ejemplo de endokarst, recibiendo estos diferentes tipos de denominaciones como: Cavernas, Cuevas, Grutas y Abrigos rocosos.

Estas son formas de conducción genuinas de aguas subterráneas, las que contienen circulación de agua se denominan activas, y muertas o inactivas cuando hay ausencia de circulación de agua; las dimensiones de las formas generadas son muy variadas, sobre todo a consecuencia de que las formas actuales no se encuentran completas, debido a que han sido obstruidas por procesos evolutivos internos o externos y no son transitables en gran parte (Llopis, 1970).

Las cavidades subterráneas son formadas por diferentes procesos en muchos tipos de rocas y/o sedimentos no consolidados, pueden clasificarse según su origen o la litología de la roca huésped; sin embargo, los procesos espeleogenéticos difieren ampliamente y la mayoría de ellos no depende fuerte y directamente de la roca caja (Gunn, 2004). Los sistemas de cuevas son observatorios macro, meso y micromorfológicos accesibles que pueden dar pistas de gran valor para entender la espeleogénesis, la morfología de las cuevas depende esencialmente de la densidad, penetrabilidad y conexión de las fracturas y planos de estratificación además de los gradientes hidráulicos involucrados, la combinación de estas diferentes configuraciones da lugar a variadas formas de los conductos kársticos (Ford and Ewers, 1978; De Waele, 2009).

En estudios previos, se ha demostrado que la orientación de los pasajes de las cuevas coincide con la orientación de estructuras tectónicas extensionales, asumiendo la dirección del componente extensional del campo de esfuerzos como perpendicular a la orientación de los pasajes de las cuevas (Littva et al., 2015).

En cuanto al estudio de las meso y micromorfológicas estas dan fuertes indicios para interpretar su origen, evolución y condiciones del pasado hidrogeológico, la mayoría de formas son poligenéticas, formadas por fluidos que disuelven y/o erosionan, debido a los amplios controles de las variables activas y pasivas de la formación de estas últimas morfologías, y que la mayoría del tiempo registrado, varias generaciones de formas pueden superponerse en el tiempo dificultando su interpretación, la génesis en la mayoría de los casos se explica con teorías basadas en medidas geomorfológicas y en la aplicación de principios físicos y químicos (De Waele, 2009).

Las formas endokársticas han sido estudiadas en diferentes escalas (macro-micro), la mayor variedad de formas está ligado a escalas meso o micro morfológicas, la génesis de cada una de

estas formas puede estar caracterizada por procesos específicos, descritas por Llopis (1970) como: Formas de erosión, Formas Clásticas y Formas de Reconstrucción (Espeleotemas).

4.1.2.1 Formas de erosión. Son las primeras formas en el proceso kárstico, su génesis está ligada a la circulación de agua por las aperturas conectadas (Llopis, 1970), en el estudio de la macromorfología, las cavidades se catalogan de manera general (Tabla 2), dependiendo de ciertos aspectos internos (su extensión, sus condiciones hidrogeológicas, su desarrollo y disposición en el espacio) y externos (Ford y Williams, 2007), una clasificación espeleométrica realizada por Nuñez (1970) denomina abrigo rocoso cuando es un salón subterráneo de pocos metros, grutas a las cavidades que no superan los 10 metros, cuevas cuando son un conjunto de galerías y salones de menos de 1 km de extensión, y si es mayor a 1 km se denominan cavernas; estos conductos son consecuencia de que la presión que el agua ejerce sobre las aperturas es radial, y como se ha desarrollado en la intersección de dos diaclasas o de una diaclasa y un plano de estratificación, y la presión radial se ejerce por igual en todas direcciones (Llopis, 1970). Las cuevas generadas en roca caliza están regidas por una morfología que depende del tipo de apertura pre-solucional y de la recarga, debido a que el flujo de agua subterránea debe ser suficiente para remover las partículas disueltas en las aperturas y mantener insaturada el agua con las paredes solubles (Palmer, 1991; De Waele, 2009), regidos los elementos tectónicos sobre los que se han instalado y se regirán por la ley fluvial fundamental de la máxima pendiente y mínima resistencia, si los planos de estratificación ofrecen menos resistencia que las fracturas, las secciones de las cavidades de harán más amplias en sentido horizontal, si la menor resistencia las ofrecen las diaclasas los conductos se desarrollarán de forma vertical (Llopis, 1970); generalmente en las zonas vadasas los conductos

tienden a cortar verticalmente hacia abajo, mientras que en la zona freática se desarrollan como pasos alargados en la dirección del movimiento del agua (Fairchild y Baker, 2012).

Tabla 3.

Diferentes Clasificaciones de las Cuevas de disolución. Adaptado de Ford y Williams (2007).

Relacionadas a Características internas	Relacionadas a Factores Externos
Dependiente de su tamaño, de su longitud, profundidad y volumen	Formas de Control geológico: Tipo de roca y Control estructural
Por mediciones de las dimensiones verticales o horizontales	Configuraciones Topográficas
Debido a la forma del plano: Entrada, Camara, Pasajes,	Dependiente de su tipo de acuífero
Según la forma de la sección transversal del pasaje	Por su rol en los ciclos geomorfológicos e hidrológicos
Relacionado al nivel freático local y regional	Por configuraciones climáticas

Las formas de erosión varían dependiendo del dominio de la presión hidrostática o si han sido formadas por erosión fluvial de manera individual, el conjunto o unión de diferentes formas individuales se da debido a que en la mayoría de los casos la presión hidrostática es priora a la erosión fluvial, indicando que las formas generadas por la presión llegarían a ser más antiguas que las generadas por erosión fluvial donde se pueden dividir en 4 categorías principales (Claviformes, Fungiformes, Gladiformes, Rosariformes) (Llopis, 1970).

4.1.2.2 Formas clásticas. Es el resultado de procesos epigeos similares a la hora de la deposición de partículas, donde los depósitos dados a ambientes denudacionales como lo son los colapsos de las paredes y/o techos se presentan con alta frecuencia (Llopis, 1970), teniendo en

cuenta que, así como en los ambientes epigeos existen dependencias a los caudales, en el endokarst es similar ocasionando depositación de sedimentos dependiendo de la dinámica hidrológica del conducto, estas formas generalmente enmascaran a las formas de erosión debido a la superposición de estas; otras veces las destruyen o borran los registros de las formas erosionales debido a la deposición de las diferentes partículas en los conductos (Llopis, 1970). En los acuíferos kársticos los sedimentos son introducidos al sistema por las corrientes superficiales que se hunden, a través de las simas, los conductos verticales, las fracturas abiertas y otros caminos desde la superficie de suficiente apertura para permitir el transporte impulsado gravitacionalmente y por flujo. La mayoría de los clastos transportados tienden a ser episodios de carga de sedimentos retenidos en almacenamiento hasta un evento de flujo, la mezcla de los diferentes tipos de clastos depende de la disponibilidad del material en el área fuente, la distinción de facies son reconocibles dependiendo de las dinámicas del flujo dentro de las cavidades (Myroie y Sasowsky, 2004).

4.1.2.3 Formas de reconstrucción (espeleotemas). Son formas generadas por procesos de reconstrucción dados por la precipitación de los componentes disueltos en el agua kárstica, generando asociaciones macroscópicas y microscópicas de cristales, que en su conjunto dan las formas que corrientemente encontramos en las cavidades; la química del agua kárstica en la mayoría de los casos no está constituido generalmente por el ácido carbónico y sus iones asociados, es dependiente a la composición de la roca caja donde los elementos asociados a esta son incorporados durante la corrosión y erosión (Llopis, 1970), indicando que la roca caja es una de las principales y más importantes fuentes del material aprovechado por los espeleotemas para su crecimiento y/o construcción que refleja condiciones físicas y químicas específicas dentro de

la cueva (Self y Hill, 2003). Los espeleotemas se forman normalmente en pasajes abandonados en la zona vadosa y se alimentan del agua que pasa a través del suelo en el karst superior, que es típicamente una zona de importante almacenamiento de agua (el epikarst). Los espeleotemas forman parte de una larga y compleja historia de los espacios de las cuevas, pudiendo crecer continuamente por cerca de 1000 a 100000 años (o incluso más) donde se pueden intercalar con sedimentos particulados y, en última instancia, se pueden romper con terremotos o disturbios humanos, se pueden enterrar o fosilizar, inundar, erosionar o disolver (Fairchild et al., 2006; Fairchild y Baker, 2012). Durante su crecimiento estas formas capturan en su estructura interna la respuesta de la cueva donde ha crecido al ambiente externo, ya que el ambiente endokárstico refleja el exokárstico (p.ej: la temperatura de la cueva es casi la misma temperatura externa anual promedio, la descarga de agua de goteo refleja la cantidad de infiltración), razones por las que principalmente han sido estudiados como archivos de climas pasados (paleoclimas) que han llevado a significativos avances en la comprensión de los sistemas climáticos actuales (Fairchild et al., 2006). Más de 250 minerales de cuevas son conocidos (Hill y Forti, 1997) pero solo 3 (calcita, aragonito y yeso) pueden ser considerados como comunes (Self y Hill, 2003). Hay pocas especies de minerales comunes, sin embargo, hay una gran variedad de formas de espeleotemas que pueden tomar estos minerales (Self y Hill, 2003).

Los espeleotemas pueden ser clasificados de manera general a partir de su distribución espacial: formas zenitales (cuando caen del techo), formas parietales (pared), formas pavimentarias (cuando crecen del piso de la cueva hacia el techo) (Llopis, 1970); o también pueden ser clasificadas como proponen Fairchild y Baker (2012) en rocas de goteo (“dripstones”) como las estalactitas, que crecen desde el techo de la cueva hacia abajo o las

estalagmitas que crecen desde el piso hacia el techo, y en rocas de flujo (“flowstones”) que son depósitos más continuos que se acrecionan bajo finas capas de agua en las paredes y pisos de las cuevas. La mayoría de las investigaciones enfocadas en reconstrucciones de paleoclimas en espeleotemas se han realizado en estalagmitas particularmente cilíndricas por su geometría relativamente simple, la forma y diámetro de estas dependen de: la tasa de flujo de agua (más estrecha para flujos bajos), supersaturación del agua (las aguas más supersaturadas pueden tender a precipitar más irregularmente), y la altura del goteo (el diámetro incrementa con la altura de la caída) (Fairchild et al., 2006).

Los espeleotemas varían de compactos a porosos y pueden tener de cero a decenas de porcentaje de impurezas (generalmente minerales arcillas con algo de materia orgánica). Los ejemplos de calcita tienden a desarrollar cristales relativamente grandes, elongados paralelamente al crecimiento mientras la mayoría de los ejemplos aragonitos muestran cristales fibrosos paralelos a la dirección de crecimiento (Hill y Forti, 1997 en Fairchild et al., 2006). En casi todos los espeleotemas se pueden encontrar inclusiones fluidas debido a los espacios vacíos que quedan entre los cristales en crecimiento, estas son rellenadas posteriormente generalmente con fluidos (agua y aire), son casi siempre elongadas paralelas en capas a la dirección de crecimiento donde las variaciones en la cantidad y tamaño indican ciertas condiciones del ambiente, las inclusiones típicamente conforman el 0.05 a 0.5 wt.% del espeleotema (McDermott et al., 2006 en Fairchild et al., 2006; Ford y Williams, 2007).

Un problema que existe en la depositación de minerales en cuevas es la común ocurrencia del aragonito, este es un mineral metaestable en condiciones superficiales terrestres y es propenso a la alteración a calcita, pero en espeleotemas, puede persistir por periodos de miles a millones de años aragonito en gran parte inalterado (Fairchild et al., 2006; White, 2015).

La ontogenia estudia los minerales individuales, como estos crecen, se combinan y se desarrollan, la misma especie mineral puede desarrollarse físicamente de maneras diferentes, dependiendo de los ambientes de formación, en las cuevas es posible estudiar los diferentes espeleotemas que hay y su ambiente deposicional explicando cómo crecen los espeleotemas y porque se dan los diferentes tipos (Self y Hill, 2003). Para analizar cómo crecen los espeleotemas, es necesario seguir una metodología jerárquica con el fin de ir de lo más particular a lo más general, Self y Hill (2003) proponen una jerarquía para los cuerpos minerales menores mostrada en la tabla 3 tomada de Hill y Self (2005) en White (2012), estos cuerpos se clasifican en cinco niveles (0 al 4) y cada nivel tiene ciertos ordenes de jerarquía. El nivel cero no tiene orden, es un nivel hipotético que puede conformar una orden de otro nivel; los otros niveles de jerarquía están caracterizados por cuerpos minerales menores en donde el primer nivel se caracteriza por minerales individuales o individuos que crecen de un mismo núcleo, pueden darse en cristales simples (primer orden) o en cristales divididos (segundo orden) debido a que: su crecimiento es inhibido en algunas caras o aristas, se incorporan cristalitos o cristales maclados individuales a su red resultando en varios tipos de cristales divididos, el segundo nivel de jerarquía toma en cuenta un grupo o asociación de cristales individuales junto con la interacción entre ellos y como esto afecta o limita el crecimiento individual, esta interacción puede ser directa o indirecta lo que lleva a una selección de cristales, el primer orden de este nivel son agregados simples los cuales tienen un crecimiento o intercrecimiento de la misma especie mineral, con la misma superficie de crecimiento, un desarrollo simultaneo y una textura homogénea, el segundo orden son agregados paragenéticos dados por un intercrecimiento o co-crecimiento de diferentes agregados que se formas simultáneamente y singenéticamente en el mismo ambiente de cristalización, los multiagregados pueden ser poliminerales, politexturales o

híbridos, algunos cuerpos minerales son anómalos y no poseen estructura, con un comportamiento como si tuvieran forma de agregado llamados pseudoagregados, el tercer nivel son asociaciones o colecciones de agregados texturalmente similares, crecen al mismo tiempo y en el mismo espacio de cristalización, formados en las mismas condiciones ambientales, una colección de agregados es llamada Koras, la asociación o colección de estos son una jerarquía de cuarto nivel, los cuales puede dar una configuración diagnostica de los espeleotemas.

Tabla 4.

Jerarquía de la ontogenia mineral. Tomado de Hill y Self, 2005.

-
- 0. Nivel Cero:** Subindividuales
- 1. Primer Nivel:** Minerales Individuales
- 1.1. Individuales de Primer Orden
 - 1.2. Individuales de Segundo Orden
 - 1.2.1. Cristales Divididos
 - 1.2.1.A. Esferulitas
 - 1.2.1.B. Ramas Esferulíticas
 - 1.2.1.C. DiscoEsferulitas
 - 1.2.1.D. Esferoidalitas
 - 1.2.1.E. EsferoCristales
 - 1.2.2. Cristales Esqueletos
 - 1.2.3. Cristales Maclados
 - 1.2.4. Cristales de Tornillo
 - 1.2.5. Cristales en Bloque
 - 1.2.6. Complejos
- 2. Segundo Nivel:** Asociación de Individuales
- 2.1. Agregados
 - 2.1.1. Agregados Columnares Paralelos
 - 2.1.2. Agregados Esferulíticos
 - 2.1.2.A. Núcleos Esferulíticos
 - 2.1.2.B. Esferulitas Irregulares
 - 2.1.3. Agregados Fibrosos Radiales
 - 2.1.4. Agregados Ramificados
 - 2.1.4.A. Coralitos
 - 2.1.4.B. Cristalictitos
 - 2.1.5. Agregados Fibrosos
 - 2.1.6. Agregados Interactivos
 - 2.1.7. Otros Agregados
 - 2.2. MultiAgregados
 - 2.2.1. MultiAgregados Poliminerales
 - 2.2.2. MultiAgregados PoliTexturales
 - 2.2.3. MultiAgregados Híbridos
 - 2.3. PseudoAgregados
 - 2.3.1. Cuerpos Minerales Tufáceos
 - 2.3.2. Moonmilk
- 3. Tercer Nivel:** Asociación de Agregados
- 3.1. Koras
- 4. Cuarto Nivel:** Asociación de Koras
- 4.1. Conjuntos
-

4.2 Patrimonio Geológico

El estudio de la geodiversidad y el patrimonio geológico de los territorios es una de las áreas de investigación más recientemente incorporadas dentro de las Geociencias, solo en algunos países pioneros como Gran Bretaña se inició a mediados del siglo XX, y surgió a partir de la concientización de ver los elementos geológicos de singular interés (Patrimonio Geológico) como un recurso no renovable que puede aportar de manera significativa al desarrollo sostenible de las zonas rurales principalmente (Carcavilla et al., 2014; Palacio et al., 2016).

La geodiversidad y el patrimonio geológico son conceptos diferentes con métodos de estudio diferenciados, aunque ambos términos están estrechamente relacionados. El estudio de la geodiversidad debe centrarse en tres aspectos: 1) analizar la diversidad geológica, 2) valorarla y relacionarla con el patrimonio geológico y 3) buscar los nexos y relacionarla con la biodiversidad y con otros aspectos geoculturales, como el paisaje. A su vez, el análisis de la geodiversidad debe definir unos parámetros que permitan comparar territorios diferentes, teniendo en cuenta: 1) la variedad geológica de cada región (geodiversidad en sentido estricto) y 2) la relación entre los elementos que definen esa geodiversidad, mediante el análisis de una serie de parámetros referidos a la abundancia, frecuencia y distribución, en función de los cuales pueden diseñarse unos modelos teóricos de organización (Carcavilla et al., 2007).

La función social del patrimonio geológico se alcanza principalmente en parques nacionales o estructuras similares (p.ej: parques naturales, reservas naturales, monumentos) donde es apoyado a través de acciones informativas e interpretativas, con paneles interpretativos, brochures, folletos, guías de campo, sitios web, museos y centros interpretativos. Muchas experiencias, principalmente en geoparques, han mostrado que el geoturismo ha estimulado habilidades

creativas en algunos de sus agentes activos (p.ej: restaurantes), quienes desarrollan productos turísticos relacionados al patrimonio geológico local (Henriques et al., 2011).

Carcavilla et al (2016) resume las líneas de trabajo del patrimonio geológico en 4 grandes ejes: inventarios, legislación, geoconservación sensu estricto y la divulgación. El primer paso es el inventario, ya que no se valora lo que no se conoce, en el segundo es imprescindible el contar con un marco legal que apoye y garantice la Geoconservación, una vez se conoce la ubicación y relevancia del patrimonio geológico y se cuenta con herramientas legales para su protección, se debe aplicar ese marco legal y trabajar en hacer efectivas todas las acciones que aseguren la conservación del lugar, y finalmente se podrá aprovechar el patrimonio geológico como un recurso para el disfrute y beneficio de la sociedad.

En Colombia el patrimonio geológico se estudia desde los años ochenta, en algunas épocas con más apogeo y en otras con poca investigación. Las investigaciones se han centrado principalmente en propuestas metodológicas útiles para el estudio y valoración del patrimonio presente en el territorio, con criterios que tienen en cuenta tanto el contexto geológico nacional, como su realidad sociopolítica (Palacio et al., 2016). Durante las últimas décadas varios autores llamaron la atención de la necesidad de que en Colombia se reconociera al Patrimonio Geológico por su importancia desde el punto de vista científico, pedagógico, ambiental, turístico, entre otros, resaltando la ausencia de un marco legal específico dirigido a la protección del patrimonio geológico, “la ley 99 de 1993 por medio de la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente tanto en sus principios generales como en su articulado tiene varios artículos susceptibles de ser interpretados como medidas de protección al patrimonio geológico, pero se hace necesario un reconocimiento oficial y explícito del mismo; en todo caso, la ley Colombiana es parca y no protege lo correspondiente a la geología” (Colegial et al., 2002, p.

124). Estas preocupaciones se esperan sean solventadas con el decreto 1353 del 31 de julio de 2018 expedido por el Ministerio de Minas y Energía con el cual el gobierno estableció el Sistema de Gestión Integral del Patrimonio Geológico y Paleontológico de la Nación para la identificación, protección, conservación, rehabilitación y preservación para las futuras generaciones del Patrimonio Geológico, como parte del patrimonio cultural y natural de la nación. Algunas de las disposiciones más importantes de este decreto son:

- El Servicio Geológico Colombiano establecerá la metodología a seguir para la declaratoria de los bienes de interés geológico y paleontológico, como geotopos y geositios (Artículo 2.2.5.10.4).
- El Servicio Geológico Colombiano será la entidad que establecerá los lineamientos específicos aplicables en aspectos como protección, conservación, infraestructura y funcionamiento interno, y colecta de material geológico y paleontológico, entre otros (Artículo 2.2.5.10.5).
- El Servicio Geológico Colombiano establecerá mediante resolución el trámite a seguir para el registro en el Inventario Nacional Geológico y Paleontológico - INGEP de los bienes de interés geológico y paleontológico en poder de particulares (Artículo 2.2.5.10.1.1).
- Prohibición de comercializar los bienes de interés paleontológico (Artículo 2.2.5.10.1.12).

El Servicio Geológico Colombiano inició desde el 2016 el Inventario Nacional de patrimonio geológico y paleontológico inmueble en el denominado dominio Cordillera Oriental, reportando un avance actual en el inventario del departamento de Boyacá que consta de la identificación de 99 geotopos.

4.2.1 Definiciones: Las siguientes definiciones son consignadas en el artículo 2.2.5.10.2 del Decreto 1353 de 2018.

- Patrimonio Geológico: Conjunto de lugares geológicos que poseen valores propios de naturaleza patrimonial con características científicas, culturales y/o educativas, y que permiten conocer, estudiar e interpretar: el origen y evolución de la Tierra, los procesos que la han modelado, los climas y paisajes del pasado y presente, el origen y evolución de la vida.
- Patrimonio Paleontológico: Parte constituyente del patrimonio geológico integrado por el conjunto de restos directos de organismos o restos indirectos (resultado de su actividad biológica), que se han conservado en el registro geológico y al cuál se le ha asignado un valor científico, didáctico o cultural. Está integrado por los fósiles y los yacimientos donde se encuentran, que permiten conocer, estudiar e interpretar la evolución de la historia geológica de la Tierra.
- Bien de interés geológico y paleontológico: Todo elemento de naturaleza mueble o inmueble susceptible de ser objeto de estudios geológicos y paleontológicos, que haya sido o pueda ser extraído de la corteza terrestre, que se encuentre en la superficie o en el subsuelo, sumergido bajo las aguas o dentro del sustrato o fondo marino y que, de acuerdo con la metodología de valoración establecida por el Servicio Geológico Colombiano, posea un valor suficiente y sea declarado como tal por la entidad mediante resolución de carácter general.

- Geotopo: Segmento o porción espacial claramente delimitada de la geoesfera, definida en virtud de los valores patrimoniales geológicos o paleontológicos existentes en sus elementos integrantes o en el conjunto de los mismos.
- Geositio: Tipo especial de geotopo de interés global, donde los bienes de interés geológico y paleontológico individualmente o en conjunto son relevantes desde el punto de vista patrimonial geológico y paleontológico de la Nación. Los geositios constituyen por excelencia los geotopos de interés científico mundial que permiten el estudio multidisciplinario de eventos y procesos geológicos propios de la historia del planeta o de la vida; o que constituyen los registros que permiten la correlación mundial de los mismos.
- Inventario Nacional Geológico y Paleontológico: Es el registro de todos los bienes geológicos y paleontológicos de interés científico y patrimonial que se identifiquen, en el cual se anotará su descripción, naturaleza, tenedor, quien lo declaró y la condición en que se encuentra, entre otros. Dicho inventario será llevado por el Servicio Geológico Colombiano en una plataforma electrónica que integrará las diferentes colecciones y piezas geológicas y paleontológicas del país. Realizada la valoración por el Servicio Geológico Colombiano determinará qué elementos son bienes de interés, así como los geotopos y geositios que harán parte del patrimonio geológico y paleontológico de la Nación.
- Tipo: Entiéndase por tipo la definición establecida por el Código Internacional de Nomenclatura Zoológica y demás estándares internacionales.

- Zona de protección patrimonial Geológica y Paleontológica: Área de protección y aplicación de consideraciones especiales en virtud de la presencia de patrimonio geológico y/o paleontológico.

4.2.2 Geoturismo: De acuerdo a Newsome y Dowling (2018) quienes intentan dar una definición unificada del geoturismo: “el geoturismo es un turismo que se enfoca en la geología y el paisaje de un área como la base para el fomento del desarrollo de un turismo sostenible; el desarrollo de este turismo genera beneficios en el área para su conservación, sus comunidades, y la economía. El concepto de geoturismo fomenta así la idea de que, para comprender y apreciar completamente el medio ambiente, primero se deberían conocer los elementos abióticos de la geología y el clima, ya que estos determinan los elementos bióticos que se producen allí. Por extensión, estos dos componentes del entorno influyen en el panorama cultural de cómo las personas han vivido en el área en el pasado, así como en cómo viven allí hoy. Este enfoque constituye la base de una comprensión holística del medio ambiente y sus componentes y, por lo tanto, proporciona a la población residente y turística una mayor conexión con el medio ambiente en el que vive o que está visitando” (p. 306). Es común confundir los términos de geoturismo con el turismo geológico, pero este último es uno de los múltiples componentes del geoturismo que se enfoca en la visita de atractivos geológicos (Biernacki et al., 2016).

El patrimonio geológico y geoturismo son interdependientes, el patrimonio necesita ser valorado por toda la comunidad en general, para lo cual el turismo puede ser una forma efectiva de extender la importancia del patrimonio como un componente valioso del mundo natural que una vez identificado necesita ser protegido (Newsome y Dowling, 2018).

Actualmente el geoturismo ha demostrado la capacidad de dar grandes aportes al desarrollo sostenible de los territorios, por lo que es una actividad turística bastante importante popularizada en los últimos años en el contexto de la red global de geoparques de la UNESCO (GGN) que ya cuenta con 147 de estos distribuidos en 41 países, en Sudamérica están presentes en Brazil, Uruguay, Chile, Perú y Ecuador, sin la presencia de alguno en Colombia lo que demuestra lo incipiente que se encuentra el estudio del patrimonio geológico en la nación. La exponencial creación de geoparques en los últimos años ha revolucionado el modo en que se divulgan las Geociencias y la importancia que esta tiene para la sociedad y el desarrollo humano, que para un ciudadano común está última es nula. En la estrategia de gestión de un geoparque no sólo se encuentra el patrimonio geológico, sino también la biodiversidad, la arqueología y otros aspectos de la herencia cultural, con esto, las Geociencias ganaron visibilidad pública, un ciudadano común tiene ahora la posibilidad de darse cuenta de cómo la geodiversidad condiciona todo el desarrollo natural y humano. Un paisaje, por ejemplo, deja sólo de ser apreciado por su valor estético, pero también por lo que representa en términos de evolución de los procesos geológicos, biológicos y humanos (Rodrigues, 2009).

La existencia de turismo en cuevas (espeleoturismo) depende de muchos factores, como las condiciones específicas de cada cueva, la existencia de infraestructura, atracciones específicas, la relación entre la demanda y el posible flujo de público en la cueva, el conocimiento de los impactos negativos (Figueiredo, 2014). Una misma caverna puede tener diferentes tipos de usos, sin embargo, de acuerdo a Santos et al (2007) entre las principales posibilidades espeleoturísticas se pueden encontrar las siguientes actividades:

- Espeleoturismo Contemplativos, basado en la belleza del paisaje kárstico, vestigios de patrimonio paleontológico o cultural, entre otros.

- Espeleoturismo Educativo, en donde las posibilidades de aprendizaje de los diferentes campos de las áreas kársticas son innumerables.
- Espeleoturismo de aventura, el cual es normalmente el más difundido y tiene innumerables posibilidades.
- Espeleoturismo Místico o Religioso, en varias cuevas alrededor del mundo existen iglesias y altares construidos en cavernas.
- Espeleoturismo médico o espeleoterapia, los beneficios de terapias en cuevas son conocidas desde hace muchos años, siendo muy popular en Europa del E, Rusia y Asia; siendo usado especialmente para tratar enfermedades respiratorias crónicas como el asma (Nica et al., 2007).

Las cuevas que han sido destinadas para un público más amplio, en las que se han realizado cambios para permitir el acceso son conocidas como show caves, las cuales se utilizan para el espeleoturismo de masa. Actualmente, alrededor de 500 de las show caves más grandes del mundo reciben numerosos visitantes al año. Si se consideran todas las actividades relacionadas con la existencia de una show cave (transporte, alojamiento, guías y otros), cerca de 100 millones de personas estarían directa e indirectamente involucradas en beneficios económicos (Cigna y Forti, 2013). En algunas zonas de Santander donde se llevan a cabo prácticas de espeleoturismo es común encontrar evidencia de la destrucción de este patrimonio natural irrecuperable. En algunos casos, el vandalismo ha provocado la destrucción de espeleotemas, el sellado de cuevas por razones de conservación e inestabilidad, los grafitis en los techos y las paredes, material arqueológico profanado y saqueado, y la biodiversidad amenazada por el uso inapropiado del turismo en diferentes zonas de Santander (Gelvez et al., 2018).

4.2.3 Geoeducación: El compromiso de difundir el conocimiento geológico poniéndolo a disposición de los ciudadanos y los tomadores de decisiones, ha sido reconocido como un deber ético preciso de él geólogo (Arattano et al., 2018). Cuando los LIG ilustran aspectos geológicos de uso en el sistema educacional (desde escuelas de primaria a universidades), junto con una buena calidad de exposición y fácil accesibilidad, estos resultan ser un excelente recurso educativo (Henriques et al., 2011). La geoeducación se define como: “el enfoque de aprendizaje a lo largo de la vida, alrededor de varias áreas relacionadas con el planeta Tierra, promoviendo el conocimiento científico y la sostenibilidad de sus habitantes, fomentando cambios en el comportamiento de la sociedad. La educación geológica es un componente de la geoeducación. Este es el tipo de educación enfocada en los conceptos y procesos geológicos.” (Biernacki et al., 2016, p.21). La geoeducación formal e informal solo puede promoverse de manera significativa si existe un plan de acción de geoconservación adecuado para identificar, proteger y administrar los LIG con un alto valor educativo (Henriques et al., 2011).

4.2.4 Geoconservación: Los ambientes kársticos se ha demostrado que son más sensibles a cualquier cambio en las condiciones ambientales que otros ambientes geomorfológicos, perturbando su condición pristina el mismo ingreso al ambiente subterráneo, las actividades que más impactan al endokarst y sus elementos asociados se relacionan principalmente al turismo, pues la falta de regulación hace que los visitantes en la mayoría de casos, dañen los espeleotemas, escriban en la paredes, retiren elementos arqueológicos, compacten los suelos y perturben a la fauna que vive dentro de las

cavernas; con lo que se ha encontrado en karsts del país como Antioquia que entre más conocida y pública sea una caverna, mayor es su degradación (Uasapud et al., 2018).

El turismo que maneja gran cantidad de turistas, como lo ha demostrado ser el geoturismo, tienen efectos sobre la conservación del patrimonio promocionado (p.ej: acelerar los procesos de meteorización y erosión, contaminación y degradación de los sitios). De acuerdo a las condiciones locales de los sitios que necesitan ser protegidos, las medidas para lograr la geoconservación de estas pueden incluir el mantener reservado la presencia del patrimonio o las restricciones en el acceso al sitio (Newsome y Dowling, 2018). La conservación de un determinado elemento geológico debe centrarse en prevenir, evitar, corregir o minimizar las afecciones que pueda sufrir y, en el caso de estar sujeto a la acción de algún proceso geológico activo, mantener el ritmo natural de los procesos y permitir su evolución (Carcavilla et al., 2007).

Sumado al turismo inconsciente, las forma de vida y el consumo excesivo e inconsciente de recursos naturales por los ciudadanos del mundo principalmente de los llamados países desarrollados, sumado a procesos naturales (p.ej: erosión, inundaciones) han generado significativos cambios en el paisaje terrestre y acabado con gran parte del Patrimonio Natural, entre estos el Patrimonio Geológico. Henriques et al. (2011) proponen a la geoconservación como una geociencia emergente dentro de las Ciencias de la Tierra y del Espacio, donde el conocimiento científico se somete a procedimientos de validación actuales como en otras geociencias. La geoconservación posee tres dimensiones (Figura 7): la “geoconservación básica”, donde tienen cabida los procedimientos de inventario y evaluación del patrimonio geológico, la “geoconservación aplicada”, ya que el conocimiento sustantivo sobre geoconservación es útil para otros científicos (p.ej: paleontólogos o mineralogistas cuando

patrimonio paleontológico o mineralógico necesita conservación), y la última dimensión son las aplicaciones técnicas de geoconservación, que se refiere a los materiales, instrumentos (p.ej: leyes) y/o servicios científicos de valor práctico proporcionados por la geoconservación, destinados a valorar el patrimonio geológico, a través de la elaboración y la implementación de categorías de protección asignadas a la conservación de la naturaleza o la expresión de políticas de planificación del uso de la tierra. (p.ej: parques naturales), materiales relevantes para geoeducación (p.ej: guías de campo) y servicios especiales con impacto social (p.ej: geoturismo) (Henriques et al., 2011).

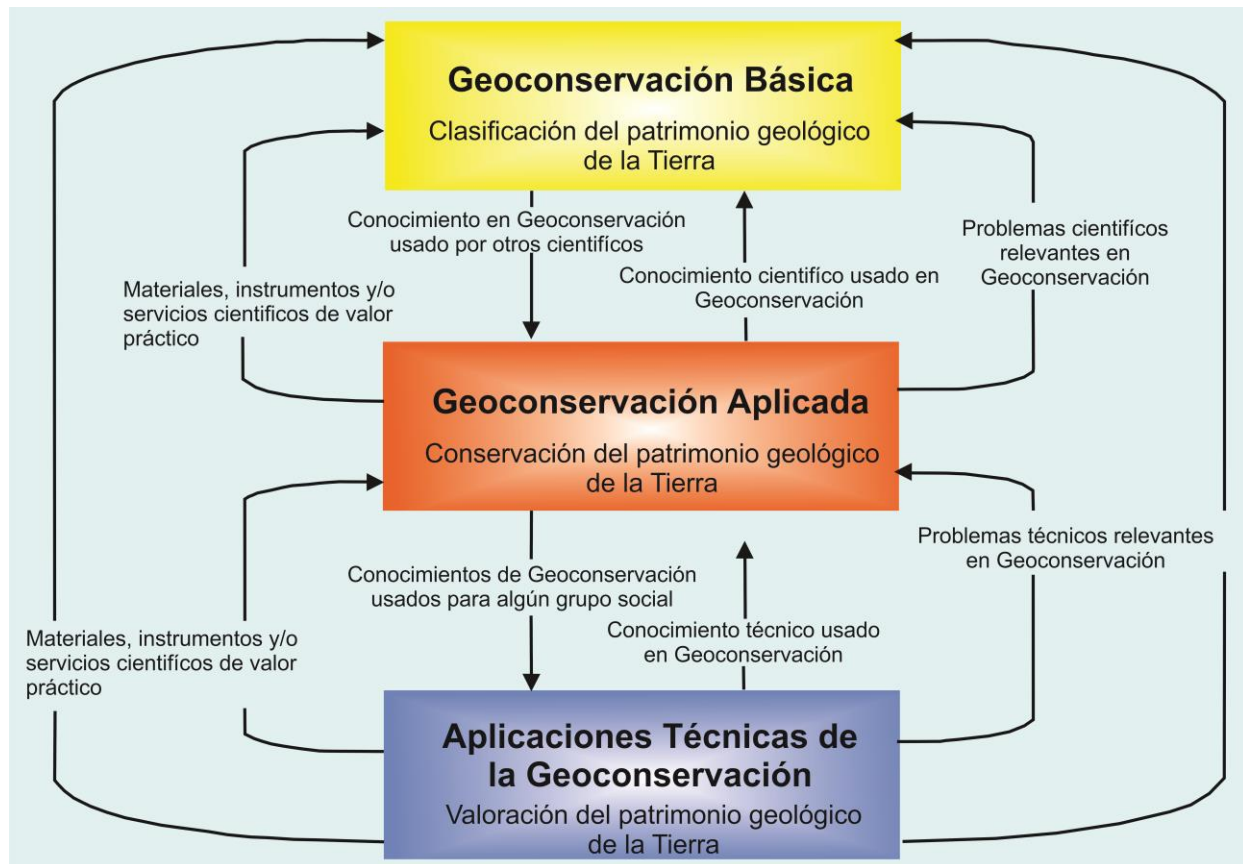


Figura 7. Diagrama de flujo representando los conocimientos, problemas, materiales, instrumentos y/o servicios entre Geoconservación Básica, Geoconservación Aplicada y Aplicaciones Técnicas de la Geoconservación. Tomado y adaptado de Henriques et al., 2011.

Finalmente, estrategias de geoconservación bien implementadas permite la creación de riqueza a través de la institución de actividades geoturísticas, garantizando al mismo tiempo un recurso educativo de innegable importancia social, además de que se asegurará la preservación del valor científico de los LIG identificados, permitiendo que las futuras generaciones de geocientíficos sigan teniendo acceso a los mejores y más completos testimonios de la historia geológica de nuestro planeta, garantizando de esta manera el progreso del conocimiento científico (Rodrigues, 2009).

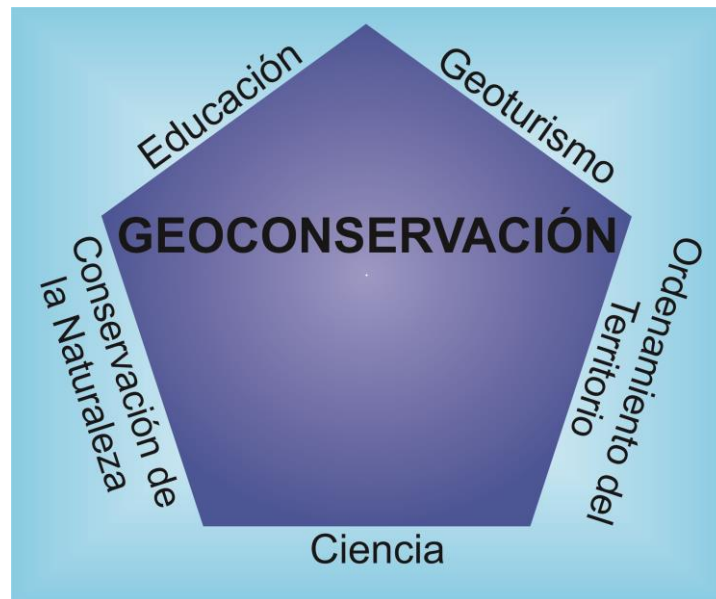


Figura 8. La geoconservación establece diversas relaciones con la sociedad, garantizando la educación y el avance científico en las áreas de las geociencias. La geoconservación permite la creación de riqueza en los territorios a través del Geoturismo. Tomado y adaptado de Rodrigues, 2009.

Sin embargo, antes de que las cuevas puedan ser administradas y protegidas activamente, las partes interesadas (incluidos los terratenientes públicos y privados, los administradores de tierras

y los responsables de la formulación de políticas) deben comprender la sensibilidad y la perturbación de los recursos encontrados dentro de las cuevas. Para enfocar mejor la atención de las partes interesadas estatales y locales sobre cómo administrar y proteger las cuevas de manera eficiente y efectiva, primero se deben inventariar y evaluar su perturbación, sensibilidad y recursos (Harley et al., 2011).

5. Metodología

5.1 Primera Fase: Precampo

Durante esta primera fase, se procedió a definir el problema y los objetivos que tendría este proyecto de investigación, enfocando la búsqueda de información y bibliografía en las temáticas relacionadas al proyecto. La información fue recopilada de diferentes páginas webs institucionales (Servicio Geológico Colombiano, Union International of Speleology) y plataformas y bases de datos libres y a las que tiene acceso la Universidad Industrial de Santander (Science Direct, Springer, Scopus, Web of Science, Scielo, entre otras).

Posteriormente se organizó la información recolectada para definir una metodología que permitiera en campo recolectar los datos necesarios para el cumplimiento de los objetivos planteados en este proyecto.

5.2 Segunda Fase: Reconocimiento y campañas de campo

Durante 4 días se realizó la primera campaña de campo, analizando en los dos primeros días la exposición de afloramientos en los márgenes de las vías que atraviesan la zona. En cada uno de los afloramientos identificados se procedió a la medición de datos litológicos (clasificaciones texturales y composicionales de campo), estructurales (planos de estratificación, fracturas, lineamientos) y a la recolección de muestras litológicas.

En los días siguientes se desarrolló el trabajo espeleológico para lo cual se contó con la guianza de Ferney Quiroga quien lidera el grupo “Andina Extrema”, quien es actualmente el único operador turístico local constituido por habitantes de la zona. Durante estas exploraciones se verificaron los mapas topográficos de las cavernas realizados por Hapka et al. (2013), se identificaron de manera general las formas de vida presentes (bioespeleología), se identificaron y describieron las diferentes formas endokársticas presentes (de erosión, clásticas, de reconstrucción) con la respectiva recolección de muestras (roca y espeleotemas), y se desarrolló un continuo registro fotográfico que resaltara los rasgos más sobresalientes de cada uno de estos potenciales geotopos. La primera exploración se llevó a cabo en la Galería Inferior de la Caverna Los Carracos, necesitando para su acceso equipo de seguridad y de cuerdas para escalada proporcionados por la guianza, alcanzando esta exploración una duración de 14 horas. La segunda exploración espeleológica se llevó a cabo en la Caverna La Tronera, accediendo por su entrada horizontal. Cabe resaltar que estas exploraciones espeleológicas se rigieron por los principios de la Geoética y el Código de Mínimo Impacto del Espeleólogo.

En una nueva campaña de campo, los lugares que fueron considerados como potenciales geotopos en las campañas pasadas de acuerdo a los recorridos realizados y a los diálogos

entablados con los locales, fueron visitados y descritos de acuerdo al Formulario Descriptivo del Lugar de Interés Geológico propuesto por el Servicio Geológico Colombiano, además de la medición de datos litológicos y estructurales. Durante una jornada de la mañana con cerca de 25 jóvenes de edades entre los 7 y 15 años se llevaron a cabo talleres de Geoeducación en la Biblioteca del municipio de El Peñón.

El trabajo espeleológico estuvo acompañado por Ferney Quiroga y se llevó a cabo en la Cueva del Oro en donde se midió la orientación de sus pasajes, se cartografiaron 440 metros de esta, se registraron las formas endokársticas y se desarrolló un breve inventario bioespeleológico; y en la Caverna Los Carracos donde se complementaron los datos tomados en la anterior incursión y se mejoró el registro visual de las formas presentes.

5.3 Tercera Fase: Laboratorio

Las muestras de estalagmitas y estalactitas fueron recolectadas de fragmentos rotos de la caverna que mostraban evidencias de actividad reciente, estas muestras fueron cortadas longitudinalmente a su eje de crecimiento. La preparación de láminas delgadas de rocas y espeleotemas para su estudio petrográfico fue realizada en el laboratorio de preparación de muestras de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Las muestras fueron analizadas en un microscopio de luz transmitida marca Nikon Eclipse E200 50/POL, con pantalla y cámara integrada, el cual se encuentra en el laboratorio de mineralogía óptica de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Para la descripción de las rocas sedimentarias carbonatadas fueron utilizadas las clasificaciones de Folk (1974) y Dunham (1962).

Las muestras seleccionadas para realizar microscopía electrónica de barrido fueron recubiertas con carbono en un equipo de recubrimiento Quorum 150ES, y las imágenes fueron tomadas en un Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission GUN) QUANTA FEG 650 ubicado en el laboratorio de microscopía de la Escuela de Geología en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander. Las imágenes fueron tomadas con las siguientes características: alto vacío, voltaje de aceleración 30kV. Detector para imágenes: Electrones secundarios (SE): Everhart Thornley detector ETD (para observar morfología); Electrones retro dispersados (BSE): Back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD (para observar variaciones de composición). Para el análisis químico: voltaje de aceleración 30Kx. Detector EDAX APOLO X resolución de 126.1 eV (en. Mn $K\alpha$) para realizar análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy). Software EDX Genesis, otorgando información semicuantitativa de los elementos químicos

5.4 Cuarta Fase: Procesamiento e interpretación de datos

Los datos estructurales medidos en campo y oficina (orientación de cuevas y cavernas, alineamientos de dolinas, diaclasas y venas) fueron procesados en el software libre Stereonet 10.1.6 donde se realizaron diagramas de rosa, de polos y estereogramas para su interpretación. Un pequeño análisis estructural de la orientación de los pasajes de las cuevas mapeadas en el sector fue llevado a cabo de acuerdo a la metodología Cavitonics propuesta por Littva et al (2015), donde solo se tendrá en cuenta la orientación de los pasajes de las cuevas, sin considerar sus longitudes. Para esto, de cada mapa se construyó una grilla mostrando la orientación general de los pasajes de las cuevas, sin incluir partes que no mostraran una clara orientación general

(salones). De cada grilla fueron medidos sus azimuths y procesados en el software Stereonet versión 10.1.6 para la construcción de un diagrama de rosas que muestra la orientación general de los pasajes de cada cavidad.

La valoración de los geotopos identificados en la zona se desarrolló con la metodología para la valoración del Patrimonio Geológico Inmueble del Instituto Geológico y Minero de España adoptada por el Servicio Geológico Colombiano (2016), la cual se basa en criterios intrínsecos (interés científico, estado de conservación, valor estético o escénico, valor multidisciplinar), su potencialidad de uso (accesibilidad, condiciones de observación, facilidad de comprensión, asociación con otros elementos del patrimonio, valor simbólico, entre otros) y su susceptibilidad de degradación (fragilidad, vulnerabilidad natural, vulnerabilidad antrópica), para mayor información acerca de la metodología de valoración se remite al lector al documento Metodología para la Valoración del Patrimonio Geológico Inmueble de libre descarga en la página web del Servicio Geológico Colombiano. Los valores de corte adoptados en esta metodología por el SGC son:

- Geotopo de valor muy alto $V \geq 7.5$
- Geotopo de valor alto $6.5 \leq V \leq 7.4$
- Geotopo de valor medio $3.3 \leq V \leq 6.4$

Un índice estandarizado: el Índice de Sensibilidad de Cuevas (CSI), fue aplicado a 3 de los geotopos estudiados para determinar su sensibilidad de acuerdo a la metodología propuesta por Harley et al. (2011). Las cuevas pueden ser sensibles a muchos factores en el ambiente, pero en este estudio se buscará solo determinar la sensibilidad de las cuevas a las perturbaciones antropogénicas. Para estandarizar este índice, se consideraron ciertas variables que son expuestas en la Tabla 4. Cada variable fue estandarizada dentro de cuatro criterios de evaluación, los cuales

se correlacionan a un puntaje de sensibilidad. La escala de sensibilidad va desde “0”, sin sensibilidad, a “3” indicando una alta sensibilidad. Los puntajes de cada variable de sensibilidad fueron sumados y después este resultado dividido por el puntaje total posible, que resulta en un número final entre 0.00 y 1.00. Este número final representa la sensibilidad relativa de una cueva a la degradación humana, representando el puntaje más cercano a uno una mayor sensibilidad general de la cueva (Tabla 5).

Tabla 5.

Indice de Sensibilidad de Cuevas (CSI). Adaptado de Harley et al., 2011.

Variable	3	2	1	0
Bióta	Gran cantidad de individuos de una especie o múltiples individuos de múltiples especies; presencia de especies en peligro o endémicas; o posibles nuevas especies	Varios individuos de una o varias especies	Pocas especies de una o varias especies	Sin recursos
Hidrología	Conexión directa con el acuífero; flujo interno de agua continuo o intermitente; goteo, filtraciones y presencia de piscinas y charcas	Goteos, filtraciones y charcas en múltiples áreas	Escasez o filtraciones, charcas y goteos localizados	Sin recursos
Geología	Abundancia de espeleotemas	Espeleotemas en múltiples áreas	Escasez o espeleotemas localizados	Sin recursos
Mineralogía	Abundancia de Minerales	Revestimientos	Escasez de	Sin

	o presencia de nuevos minerales	minerales en múltiples áreas	ocurrencias minerales (revestimientos minerales)	recursos
Paleontología	Abundancia de fósiles (en Roca)	Fósiles en múltiples áreas	Escasez de ocurrencia de fósiles	Sin recursos
Cultura o Historia	Caverna en zona protegida	Elementos culturales en múltiples áreas	Escasez u ocurrencias localizadas de elementos culturales	Sin recursos

Tabla 6.

Clasificaciones de sensibilidad. Adaptado de Harley et al., 2011.

Puntaje (Suma/suma total posible)	Grado de Sensibilidad
0.81-1.00	Críticamente sensible
0.71-0.80	Severamente sensible
0.61-0.70	Considerablemente sensible
0.51-0.60	Sensible
0.40-0.50	Moderadamente sensible
0.20-0.39	Ligeramente sensible
0.00-0.19	Sin sensibilidad

5.5 Quinta Fase: Elaboración del informe final

Durante esta fase se realizó la recopilación, análisis e interpretación de los datos y resultados que a su vez fueron discutidos con diferentes investigadores de ramas afines. Integrando todos los productos de este trabajo se culmina con la realización del informe final de este proyecto de investigación.

6. Resultados

6.1 Geología

En la zona de estudio predominan las litologías calcáreas pertenecientes a la Formación Rosablanca. En el casco urbano del municipio de El Peñón se identificaron litologías de la Formación Cumbre, y en el propuesto geotopo “cañón de panamá” se pudieron observar expresiones geomorfológicas características de la denominada Formación Arcabuco.

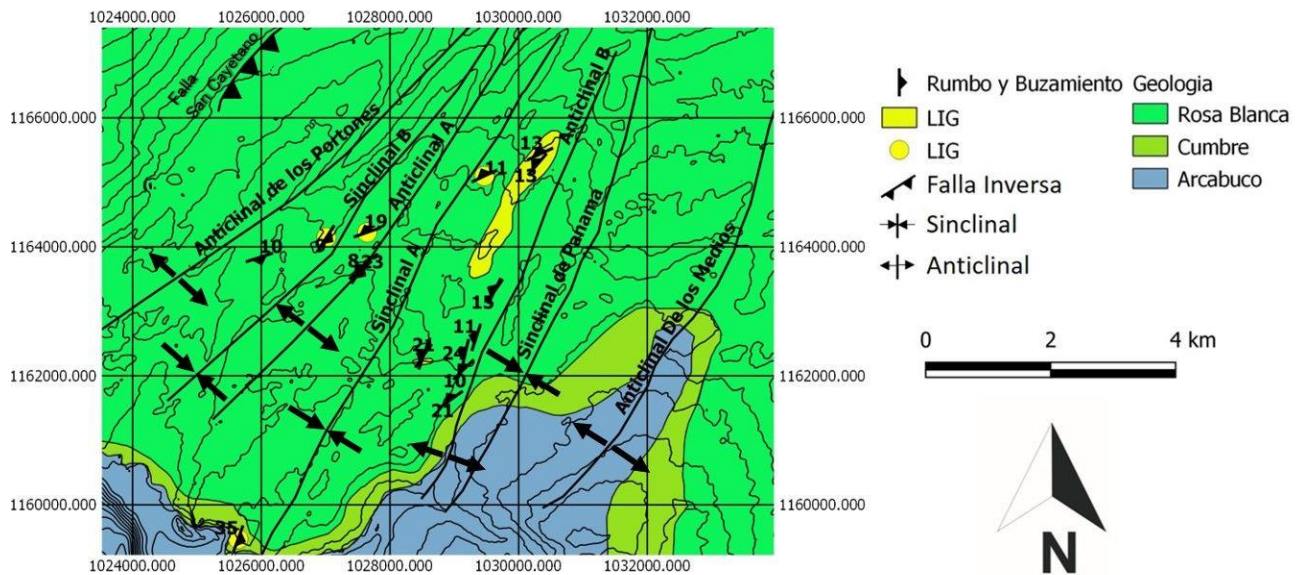


Figura 9. Mapa geológico generado del área de estudio.

Formación Rosablanca. Es la unidad litoestratigráfica de mayor extensión y a la que se asocian los procesos de karstificación bastante notorios en la zona. En la zona presenta una secuencia gruesa de cerca de 150 m, definida informalmente como paquete inferior por Gómez et al (2008) en el afloramiento reconocido como “Cueva de la Virgen” donde se presenta un escarpe de 150 metros de altura. Hacia la base una primera secuencia de cerca de 80 m está compuesta hacia la base de capas onduladas a plano paralelas de lodolitas calcáreas (mudstone) de colores grises oscuros, con muy bajo contenido de aloquímicos (bivalvos de escala milimétrica principalmente) y espesores que varían de 0,3 a 0,6 m intercaladas con láminas a capas de arcillolita grises oscuras. En las lodolitas calcáreas de la base es posible encontrar venillas y venas de calcita con trazas de pirita y calcopirita. Algunas venas alcanzan espesores de hasta 15 centímetros con cristales muy bien desarrollados de calcita (Figura 10B).

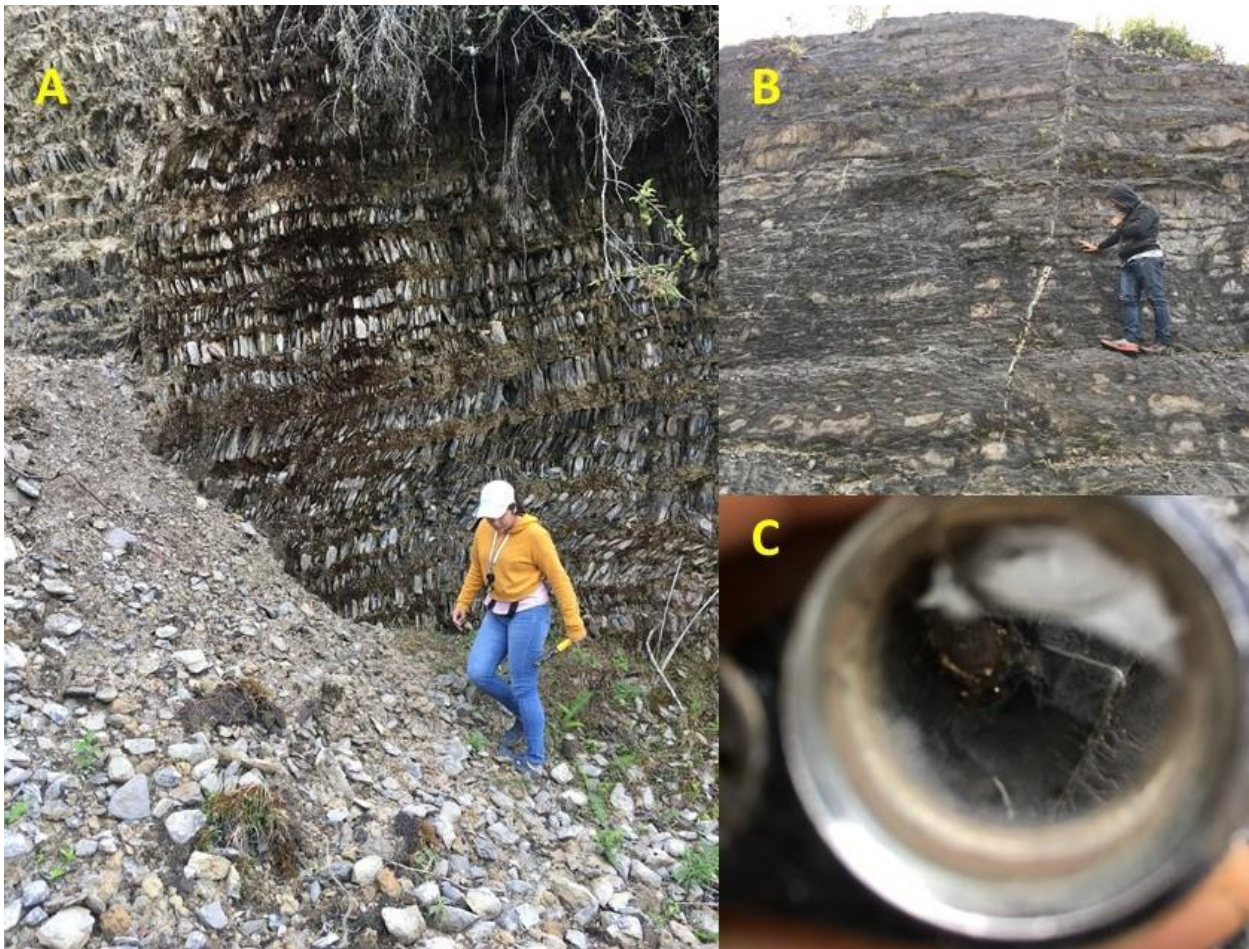


Figura 10. A) pliegues en el clivaje B) Venas de Calcita C) Trazas de pirita y calcopirita.

El siguiente segmento identificado corresponde a una secuencia de cerca de 90 m de estratos plano paralelos gruesos a muy gruesos de mudstones (de 1 a 5 m de espesor) con colores grises oscuros intercalados con algunas capas de packstones con mayor contenido fosilífero (principalmente bivalvos y gasterópodos) y arcillolitas grises oscuras. Los niveles micríticos de la formación presentan variación en relación a la cantidad de fósiles o intraclastos que se encuentran presentes, en algunas capas es una micrita fosilífera compuesta principalmente de equinodermos, bivalvos y algas, variando a micritas Intraclásticas con muy poco aporte

aloquímicos en especial de fósiles. La cantidad de fósiles en los niveles de micrita llegan lo suficientemente altos para clasificarse como una biomicrodita o biomicroarenita, en este caso es la última debido al tamaño de los fósiles presentes en la muestra, se encuentra presente equinodermos, bivalvos de diferentes tamaños, gasterópodos, algas y serpulidos.

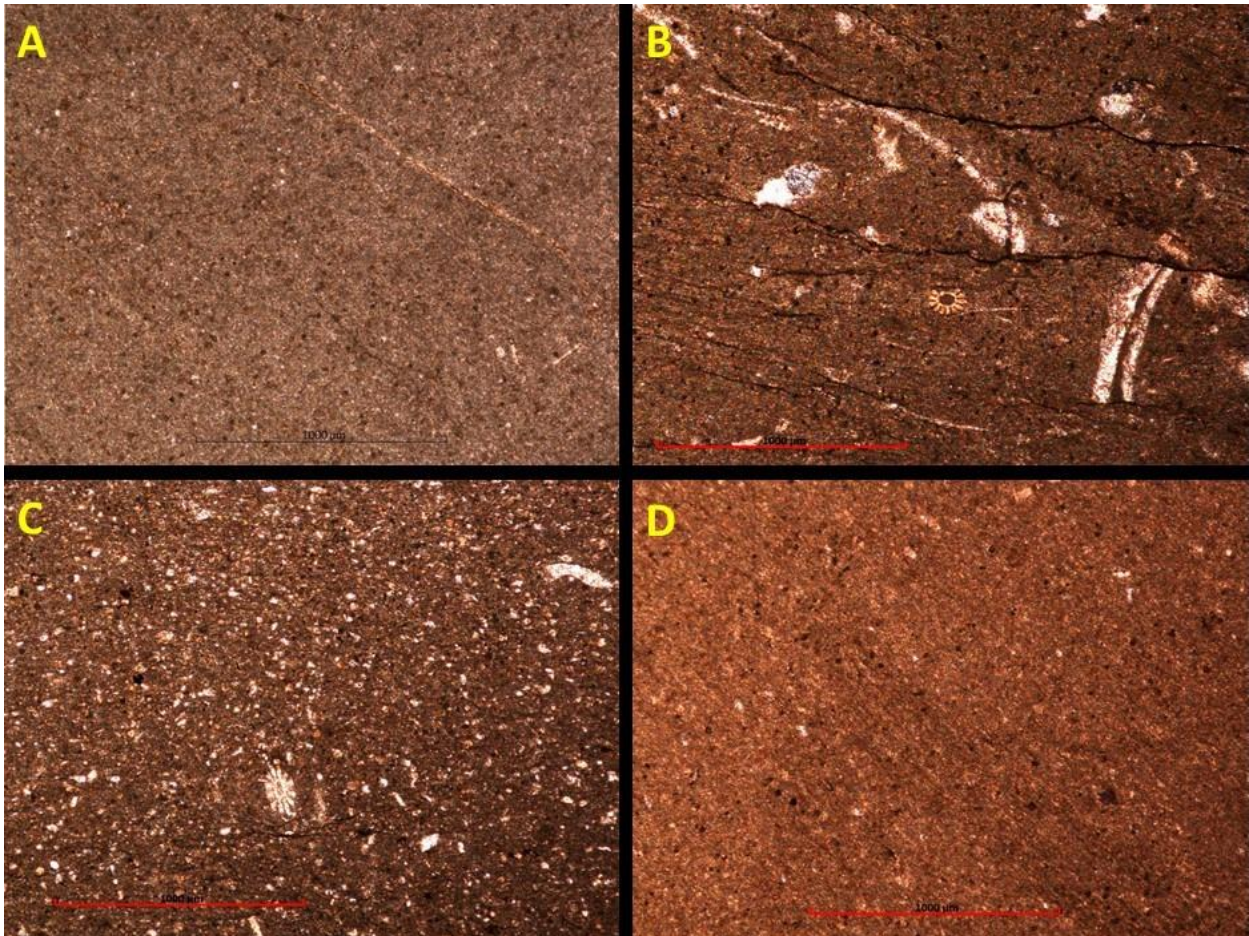


Figura 11. A) Micrita Intraclástica. B) Biomicroarenita (conchas de bivalvos y equinodermos). C) Micrita Fosilifera (Equinodermo, conchas de bivalvo) D) Micrita Intraclástica.

Las geoformas exokársticas que predominan en la zona son los lapiaces, los cuales ocurren generalmente en los márgenes de las depresiones (dolinas, uvalas o valles) en distintos tamaños, encontrándose en karren de pocos milímetros (microkarren) hasta lapiaces de 6 metros de altura

(megakarren), donde predominan los procesos disolucionales por flujo de agua (rillenkarrren, rinnenkarrren, meanderkarrren, wandkarrren, trittkarrren, karren caves, scallops, ripplekarrren) (Figura 12).



Figura 12. Karren asociado a la Formación Rosablanca. A) Megakarren de cerca de 6 metros de altura. B) Rillenkarrren C) Rinnenkarrren D) Trittkarrren E) Karren cave.

Seguidamente predominan las dolinas, con formas elípticas y circulares que presentan diámetros máximos de 35 m y mínimos de 5 m. Estas dolinas se han desarrollado en direcciones preferenciales, alineaciones que favorecen la unión entre estas que con el tiempo muy seguramente evolucionarán a úvalas y seguidamente a poljes, como ya ha pasado en el área. Así mismo, se encuentran dolinas que han evolucionado más en el eje vertical produciendo en

algunos casos la aparición de simas de pocos diámetros en su mayoría, aunque existen simas gigantes como la de la caverna la tronera.

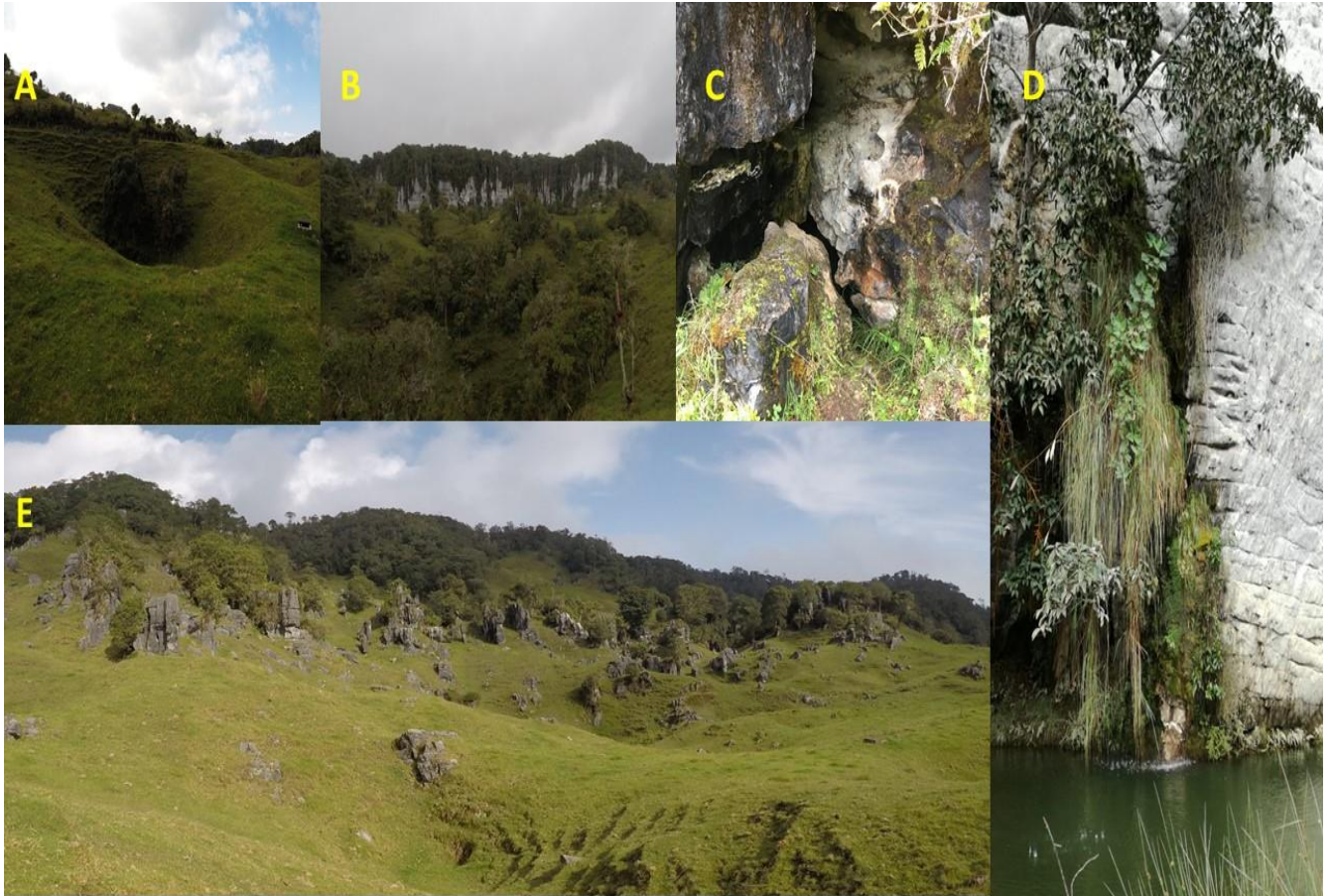


Figura 13. A) Dolina “bowl shaped” B) Meseta kárstica C) Gruta de cerca de 8 metros de desarrollo con presencia de brecha hidrotermal y desarrollo de espeleotemas cenitales con trazas de malaquita D) Surgencia kárstica en el abrigo rocoso “Cueva La Virgen” E) Campo de dolinas y lapiaces, notese la presencia de estos últimos bordeando las depresiones.

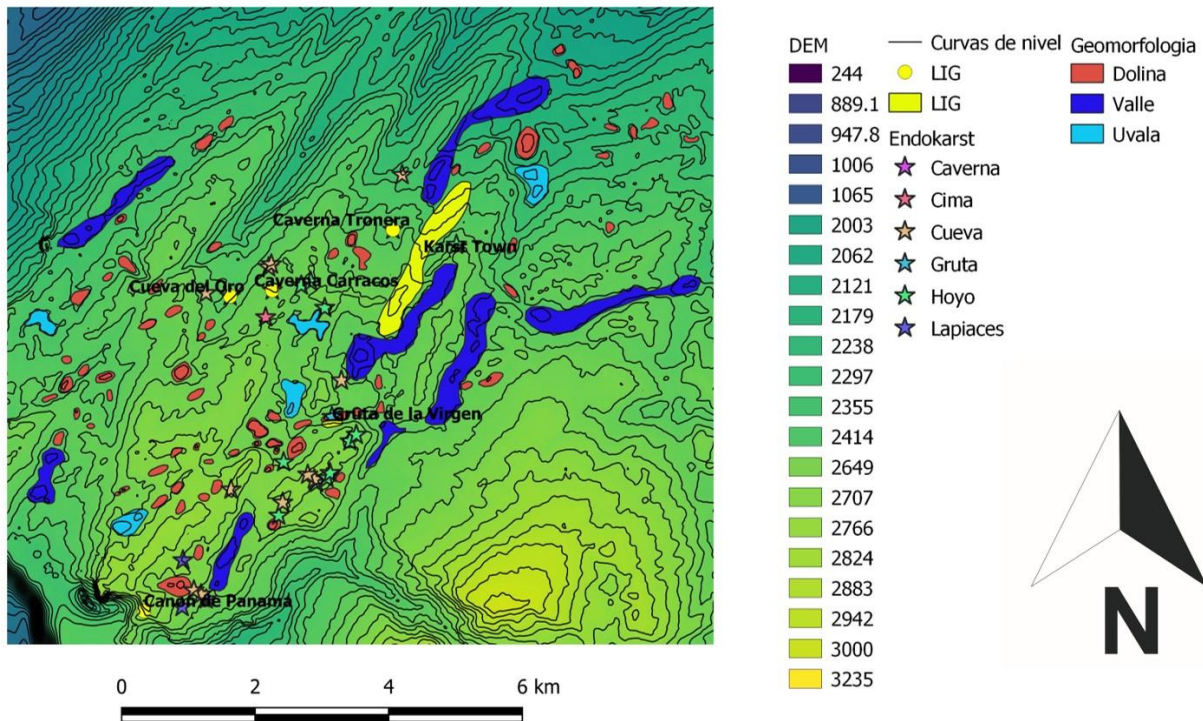


Figura 14. Modelo Digital de elevación con unidades geomorfológicas kársticas cartografiadas.

6.1.1 Geología Estructural

En los afloramientos de la Formación Rosablanca se observa la presencia de una foliación secundaria en las rocas sedimentarias, perpendicular a la estratificación, el cual imprime un aspecto de alta fisilidad a la roca, este clivaje tectónico coincide con el “slaty cleavage” reportado por Mantilla-Figueroa et al. (2003) en zonas cercanas de la Provincia de Vélez. Este clivaje también fue visto en las rocas calcáreas al interior de la caverna los carracos. Las múltiples dolinas soluciónales que se han formado en la zona se han desarrollado en direcciones preferenciales N65W y N50E, con una dirección secundaria N15W (Figura 15).

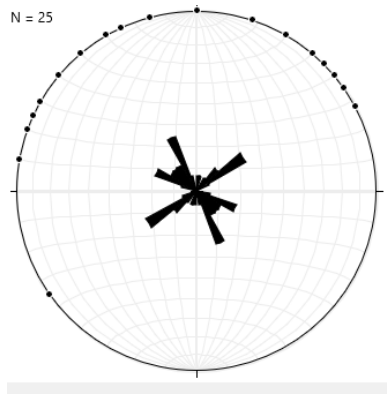


Figura 15. Orientación de los ejes mayores de las dolinas presentes en la zona.

En la caverna los carracos y la cueva del oro, se encontraron múltiples evidencias de reciente actividad neotectónica en la zona que ejerce un papel importante en el desarrollo del sistema kárstico, y en teoría debería potenciar la preservación de los pasajes con orientación paralela a las estructuras neotectónicas (Littva et al., 2015). Estas evidencias neotectónicas podrían ser la base para futuros trabajos de paleosismología en el área.

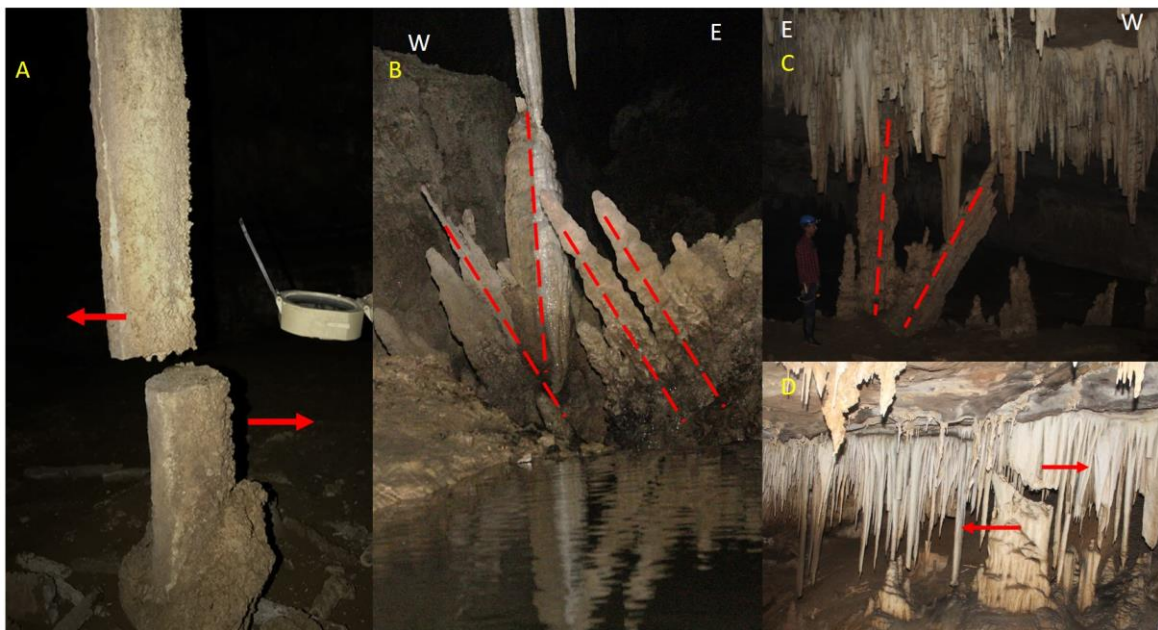


Figura 16. Evidencias de neotectónica y paleosismos preservados en el endokarst.

Hapka et al., (2015) georreferencia y cartografía más de 10 conductos subterráneos (grutas, cuevas, cavernas, hoyos) en los alrededores del municipio de El Peñón. A partir de los mapas de estos conductos y de la cueva del oro, obtenido en este trabajo, se generó una grilla para cada uno mostrando la orientación general de los pasajes de cada conducto (Figura 17).

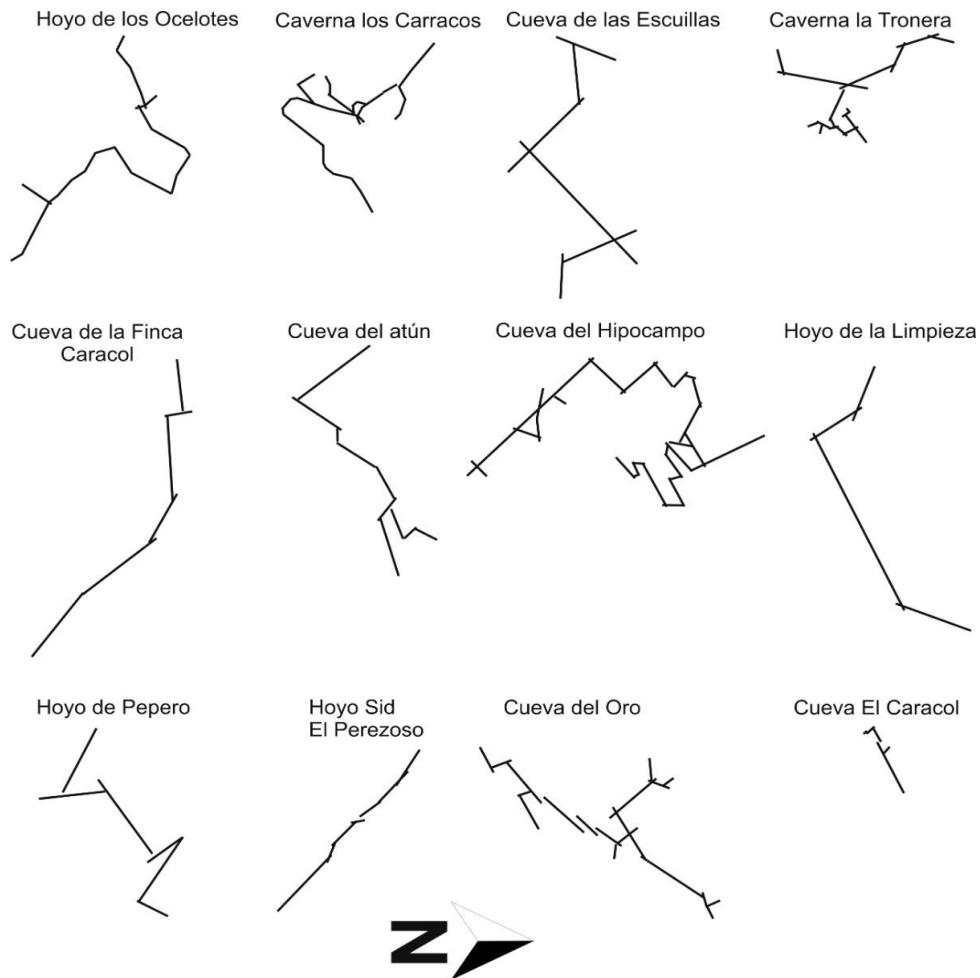


Figura 17. Análisis de los patrones de orientación de los pasajes de cavidades presentes en el área de estudio. Todas las orientaciones fueron realizadas a partir de los mapas realizados por Hapka et al., (2015) a excepción de la Cueva del Oro cuya cartografía es presentada en este trabajo.

Los diagramas rosa adquiridos para cada una de las cavidades georreferenciadas y

cartografiadas en el área de interés muestran las orientaciones de los pasajes predominantes para cada una de ellas (Figura 18). En la gran mayoría de ellas podemos observar 2 direcciones preferenciales, NE-SW y NW-SE, con algunas direcciones secundarias N-S. El diagrama de rosas mostrando todas las orientaciones preferenciales de los pasajes de las cuevas medidas, muestra 2 muy claras direcciones preferenciales, NE-SW y NW-SE, con una disposición perpendicular de fracturas de tensión respecto del rumbo de las fracturas principales (paralelas al tensor de esfuerzos), lo que confirma el carácter distensivo de la deformación más superficial de la corteza (fracturas de tensión – Modo I, perpendiculares entre sí). Como la región se caracteriza por plegamientos y fallas inversas, las fracturas de tensión con rumbo NE-SW, en algunos casos coinciden con fallas locales en las charnelas de los anticlinales.

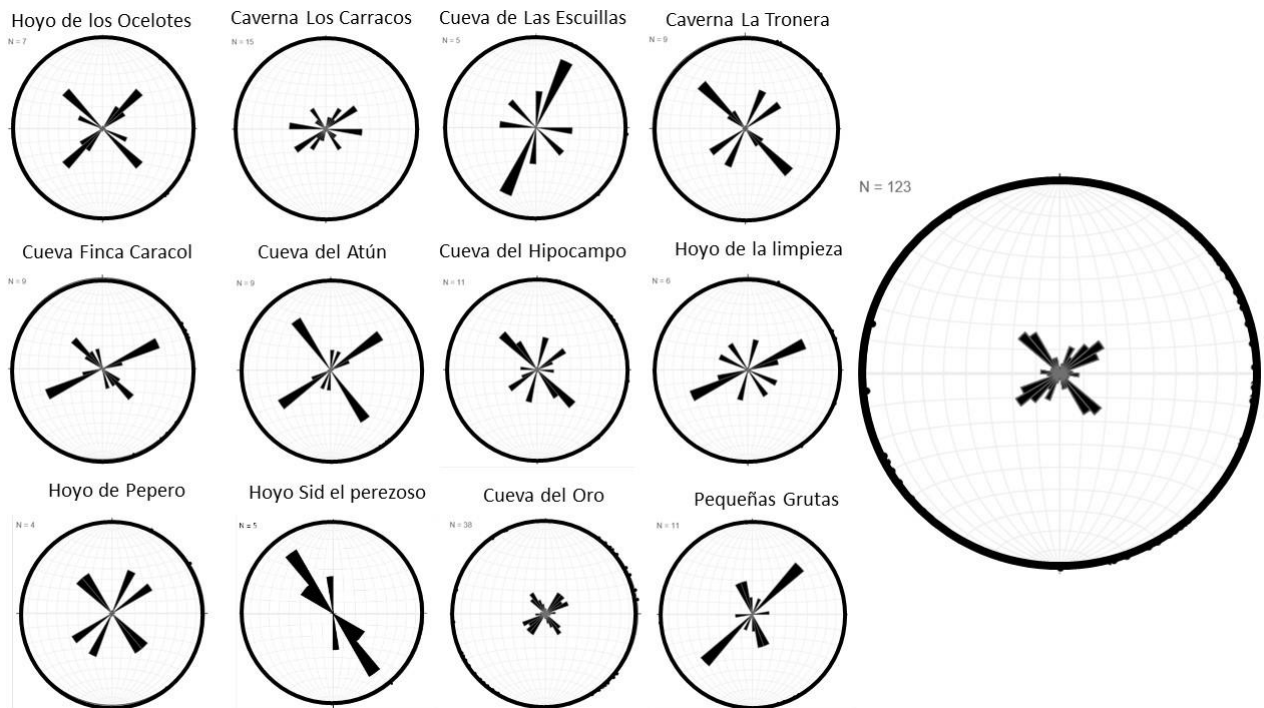


Figura 18. Análisis estructural de las orientaciones preferenciales de los pasajes de grutas y cuevas presentes en el área de estudio.

La región se encuentra limitada por pliegues regionales como lo son: el Anticlinal de los Medios, el sinclinal de Panamá y el Anticlinal de los Portones, los plegamientos locales son evidenciados por los cambios en la dirección del buzamiento, en el área entre las estructuras regionales se desarrolla el plegamiento dado por 4 estructuras, 2 sinclinales (A y B) y 2 anticlinales, los cuales siguen un rumbo similar al regional. En medio de estos se superponen las rosetas de las principales cuevas o cavernas junto con las fracturas medidas, incluido el clivaje presente (donde se encuentra) (Figura 19), el desarrollo de las cavernas se da en direcciones generadas por fracturas de tensión principalmente, sin embargo, debido a la abundancia en familias de fracturas se observan otros patrones de cavidades asociados a estas, dando lugar al diverso desarrollo del karst de la zona. El tensor local presenta una dirección NW-SE (136°) y explica las estructuras plegadas tanto locales como regionales, la perpendicularidad entre las direcciones de preferencia del desarrollo kárstico y el desarrollo de otros patrones de fractura que causan ciertas variaciones en la dirección de estas unidades.

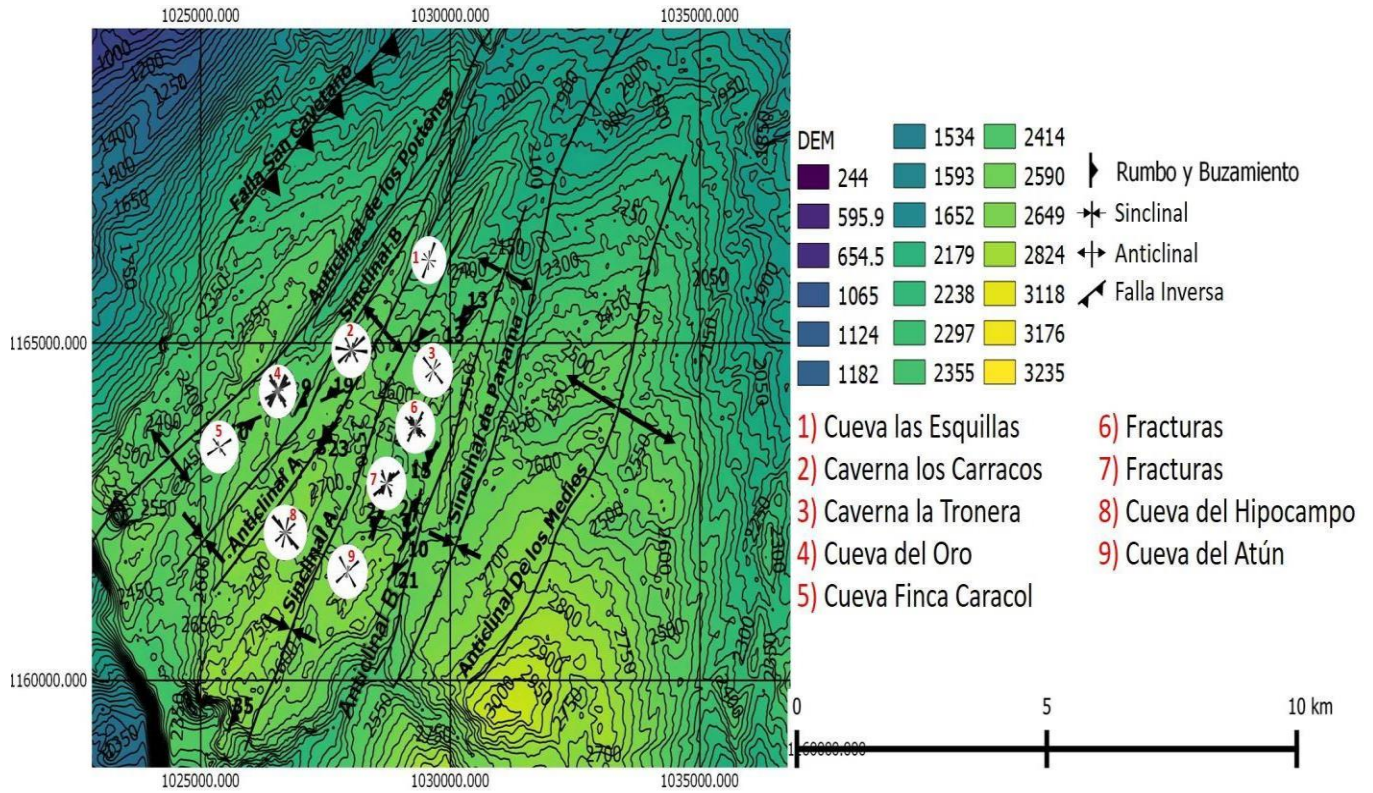


Figura 19. Modelo Digital de Elevación con las estructuras locales y regionales, diagramas rosas de las fracturas locales y de la dirección de las cavidades generadas.

6.2 Patrimonio Geológico

Tabla 7.

Geotopos identificados y valores calculados para cada uno.

LIG	CIE	DID	TUR	SDN	SDA	SD	RD	ISC
Cañón de Panamá	5.13	4.9	5.5	0.01	0.3	0.14	0.16	NA

GI Caverna Los Carracos	6.75	4.5	4.5	1.25	3.5	2.38	2.36	0.67
Cueva del Oro	4.4	4.13	4.3	1.3	4.4	2.81	1.9	0.61
Caverna La Tronera	5.25	4.9	5.75	1.25	3.75	2.5	2.15	0.55
Cueva La Virgen	5.5	5.13	5.38	0.75	1.28	1.01	0.7	NA
Karst Town	4.9	4.9	4.13	0.00	0.22	0.14	0.1	NA

NOTA: CIE: interés científico del geotopo; DID: interés didáctico del geotopo; TUR: interés turístico del geotopo; SDN: susceptibilidad a la degradación natural del geotopo; SDA: susceptibilidad a la degradación antrópica del geotopo; SD: susceptibilidad de degradación del geotopo; RD: riesgo de degradación del geotopo; ISC: índice de sensibilidad de cuevas.

6.2.1 LIG 1: “Cañón de Panamá”: Este geotopo propuesto se encuentra hacia el SW del municipio de El Peñón, sobre el camino que conduce a la Hoya de Panamá, en la vereda tendidos. Su acceso es en caminata que puede iniciarse desde el casco urbano del municipio con una duración de 2 horas (aproximadamente 4,5 km), con una inclinación promedio de 10%, donde disfrutará de un sendero adornado por los cultivos de mora de los locales, es un mirador bastante popular y frecuentado por los habitantes y visitantes de la zona, actualmente es conocido como el Cerro de Panamá y promocionado en actividades turísticas debido a su gran belleza paisajística. El Cañón de Panamá presenta valores medios en cada una de las categorías, siendo la categoría turística la de mayor valor. El riesgo de degradación (el perjuicio o daño potencial sobre el patrimonio geológico, en función de la magnitud de las consecuencias de la degradación del lugar) del lugar es bastante bajo debido a su gran tamaño.

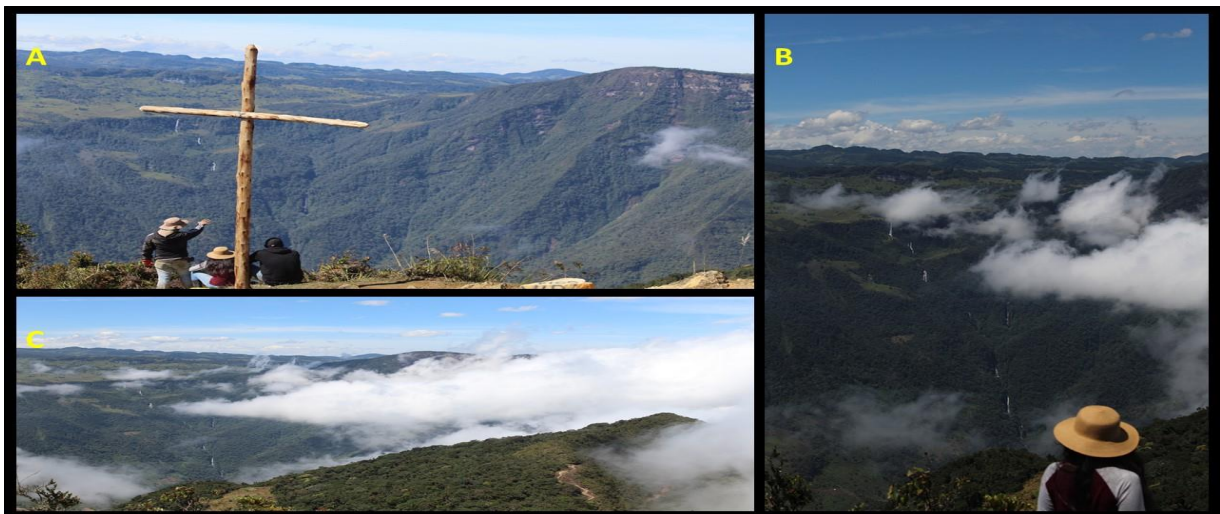


Figura 20. Belleza paisajística del Cañón de Panamá. A) Pliegues notorios B) Cascada “las siete maravillas”. C) Cañón de Panamá a punto de ser cubierto totalmente por nubes.

Estratigráficamente, este mirador se encuentra sobre Cuarzoarenitas de grano medio a fino intercaladas con capas de lodolitas verdosas. En estas litologías se encuentran venas con drusas de cuarzo de hasta 15 cm que pueden ser observadas con facilidad en cercanías al mirador. Su interés principal es el geomorfológico debido a la variedad de expresiones geomorfológicas (estructurales, kársticas, denudacionales) que se pueden observar en este sector. Además, tiene intereses secundarios: el tectónico por la claridad con la que se puede observar estructuras principalmente producto de deformación dúctil (pliegues) (Figura 21), mineralógico por la abundancia y belleza de las drusas de cuarzo que se pueden encontrar en el sector, hidrogeológico por la abundancia del recurso hídrico con la que cuenta el sector.

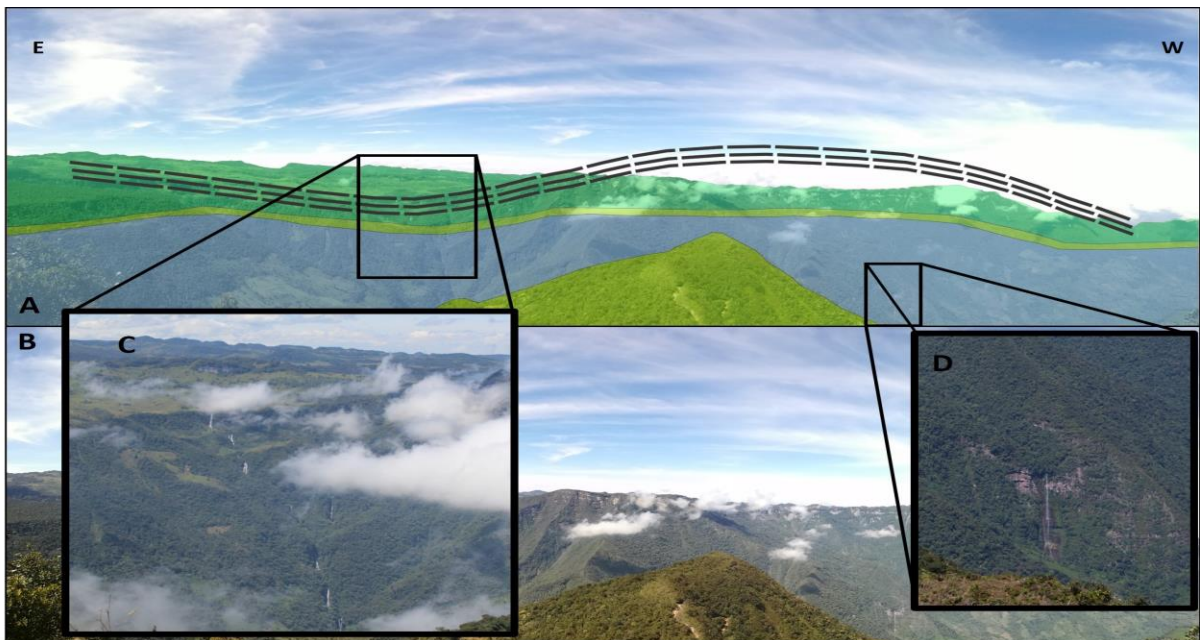


Figura 21. Mirador Cerro de Panamá. A) Esquemática estructura plegada presente. B) Panorámica. C) Cascada las 7 maravillas. D) Cascada.

6.2.2 LIG 2: Galería Inferior Caverna Los Carracos: La Caverna los Carracos se encuentra en la vereda llano de Vargas, geomorfológicamente se encuentra al costado de la terminación de un valle de dolinas, con la profundización del desarrollo kárstico en el tiempo, se han desarrollado tres niveles, en el nivel superior existe desarrollo y ciertas variedades de espeleotemas, pero la preservación de los salones y galerías ha sido afectada por las constantes visitas tanto de locales como de turistas sin una conciencia de conservación. El siguiente nivel es en el que se enfoca este trabajo, para acceder a este nivel inferior es necesario hacer un descenso en la vertical de unos 20 m aproximadamente, razón principal por la cual es en esta galería en donde se preservan la mayor variedad de espeleotemas en cuanto a forma y composición (Figura 22).

El salón inicial del primer nivel y el segundo nivel fueron los lugares escogidos para hacer el análisis mineralógico, espeleotemático de la caverna y los parámetros asociados a su valoración fueron calculados para la galería inferior. Este geotopo presenta un valor científico alto (6.75), destacando las importantes investigaciones que se han desarrollado en este (publicaciones, tesis de maestría, tesis de doctorado) principalmente en los campos de la bioespeleología (Campos et al., 2018) y la paleoclimatología (Ramírez, 2014; Ramírez, 2019). Presenta un riesgo de degradación que representa una prioridad de protección relativamente baja (medidas de Geoconservación a medio o largo plazo) y un índice de sensibilidad de 0.67 que la clasifica como considerablemente sensible a las perturbaciones antropogénicas.

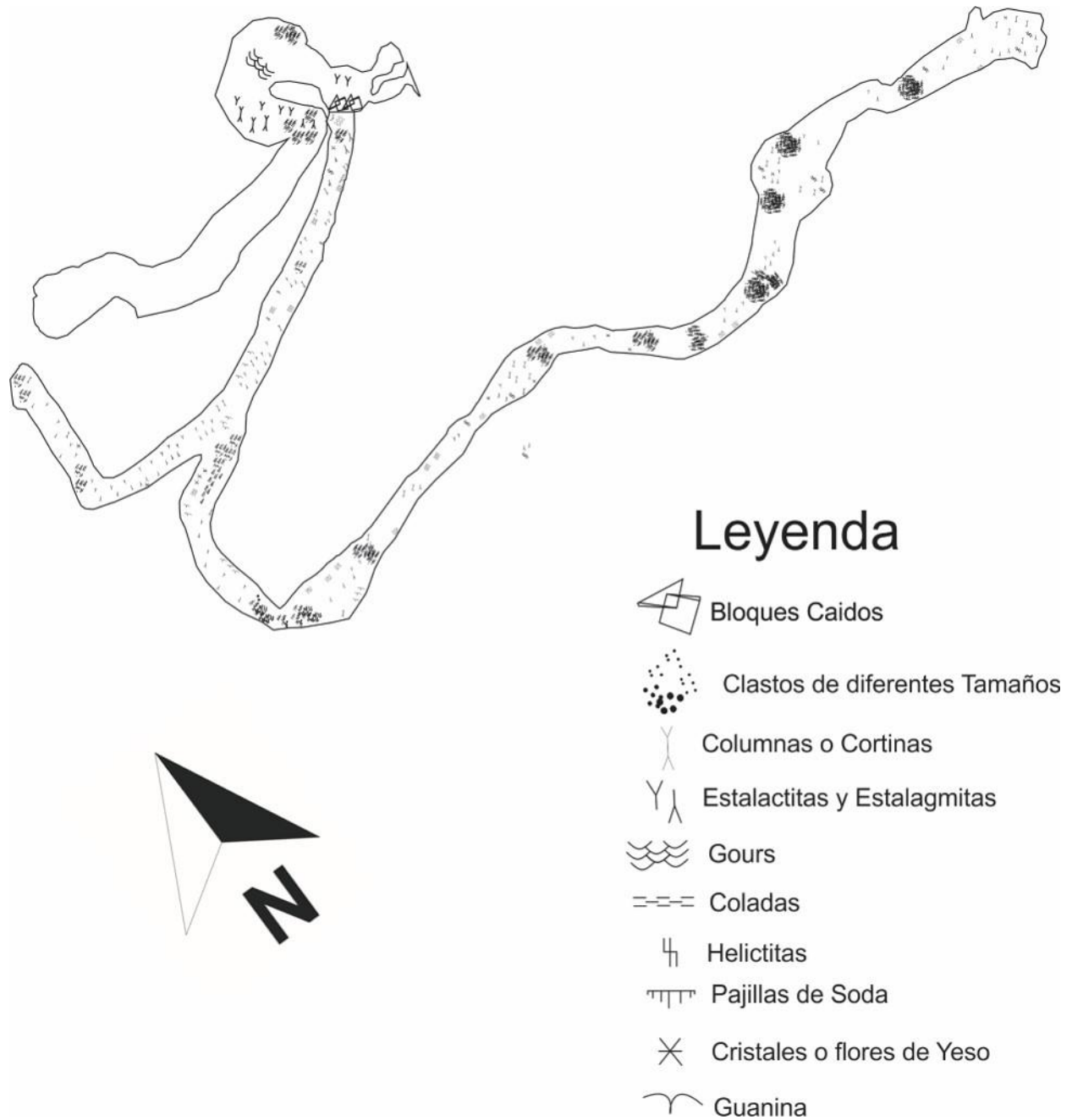


Figura 22. Mapa geoespeleológico de la galería inferior de la Caverna Los Carracos. Adaptado de Hapka et al., (2015)

Los carbonatos son los minerales dominantes en los espeleotemas presentes en esta galería, sin embargo, en algunos casos existen espeleotemas completos o zonas locales de este, donde la especie mineral cambia o pueden presentar impurezas en su red cristalina, el crecimiento de diferentes minerales y diferentes formas de espeleotemas indican condiciones ambientales específicas además de un aporte o enriquecimiento de ciertos elementos. En esta caverna se registraron los datos de pH: 8.2, TDS: 126 y Temperatura: 16.7°C en pequeñas piscinas de la galería inferior.

Espeleotemas de Carbonatos: El mineral más común es la calcita (CaCO_3) presente en sus diferentes hábitos y tamaños, el polimorfo de CaCO_3 de alta presión es el Aragonito presente en diferentes espeleotemas, en algunos casos conformándolos totalmente. Otros Carbonatos como la siderita y la magnesita están presentes en los diferentes espeleotemas en algunos casos con indicios de meteorización, el yeso se encuentra presente en algunos espeleotemas de formas muy particulares.

Dripstone y Flowstone: La variedad y abundancia de los espeleotemas de goteo en la caverna es significativa, los que crecen del techo (cenitales) presentan la mayor variedad en cuanto a las formas, en el caso de las estalactitas del primer nivel principalmente están compuestas por Calcita en hábito columnar predominantemente, desde este nivel hasta la galería inferior se observan intercalaciones junto con la calcita de carbonatos como la siderita y la magnesita que al ser oxidados generan colores rojizos y ocres que se superponen a los espeleotemas dándole estas tonalidades, si bien el aragonito en el primer piso no es tan frecuente en los espeleotemas cenitales en la galería inferior se observa en múltiples estalactitas. Estas varían de tamaño en la caverna, sobre todo en la galería inferior donde se observan que están unidas a las estalagmitas formando columnas, pero en estos mismos salones se encuentran estalactitas en crecimiento de

tamaños mucho menores indicando la actividad actual de la caverna, la galería inferior muestra una variedad de pajillas de soda, las cuales se destacan por la relación diámetro-largo en donde el largo es superior al diámetro dando el aspecto como si fueran “pitillos” con una composición de carbonatos muy similar a las estalactitas con la excepción que estas presentan niveles de aragonito en la mayoría de los ejemplares.

Las antoditas, helictitas y/o excéntricas se generan cuando hay carga hidrostática de la solución y el flujo es menor (Huff, 1940), están presentes en la galería inferior con una abundancia alta compuestas principalmente de calcita aunque muchas de ellas, especialmente las de más reciente crecimiento se encuentran conformadas solo por aragonito indicando que las variedades de éstas que tienen un tamaño mayor presentan niveles de aragonito y calcita, donde el aragonito sufre recristalización a calcita, la dirección y sentido de crecimiento de las excéntricas varían mucho mostrando su propiedad más característica la cual es un comportamiento adaptable donde los obstáculos no impiden su crecimiento (Figura 23), y donde sus formas irregulares son dadas por cambios en la dirección de los cristales crecientes, estas variaciones resultan en diferentes formas algunas similares a ciertos objetos comunes y corrientes (Figura 23B).

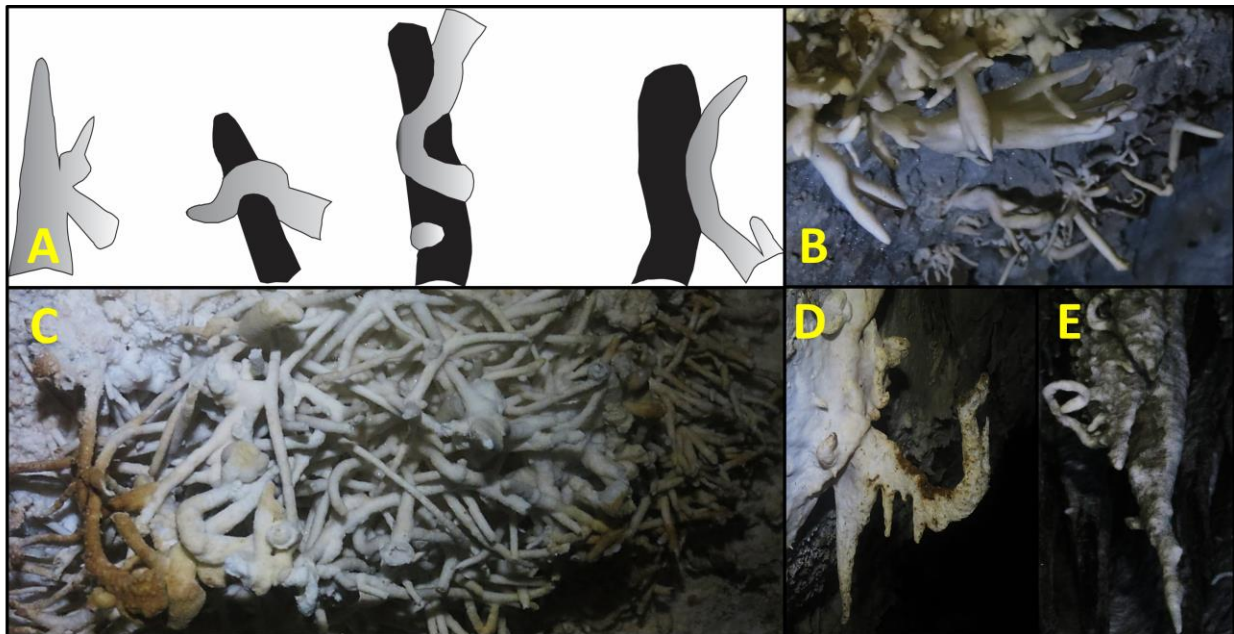


Figura 23. A) Propiedad de comportamiento de las helictitas en su crecimiento. Tomado y adaptado de Self y Hill (2003). B) Conjunto de Helictitas, C) Helictita en forma de mano o dedos, D) y E) Helictitas asociadas a Dripstone y Flowstone.

Las estalagmitas es uno de los espeleotemas de goteo más común siendo el reflejo de la gota de la estalactita que cae en el suelo, estos espeleotemas crecen en contra de la gravedad agrupándose en niveles uno sobre otro lo cual indica que la base es más antigua que el tope, generalmente con alturas máximas de 8 m y algunas en crecimiento a escalas de centímetros, la relación entre radio y altura en algunos casos cambia siendo de un radio relativamente menor en comparación con su altura, en ciertos salones o galerías presentan crecimientos de coraloides sobres estas. La calcita es el mineral principal que compone a estos espeleotemas con una variedad mayor en cuanto a su fábrica siendo columnar y en algunos casos microcristalina, algunas estalagmitas pueden estar compuestas de solo aragonito tabular o con algunos niveles menores intercalados de calcita.

En los espeleotemas generados por flujos de agua se observan variedad de formas parietales como algunas Coladas hasta de 15 m ubicadas en el descenso al segundo piso, cortinas hasta de 4 m, banderas con dimensiones similares. Estos espeleotemas están constituidos principalmente por calcita columnar o microcristalina, mostrando algunas variaciones con capas de menor espesor de siderita, estas variaciones reflejan diferentes colores (Figura 24) dando lugar a la variedad “tocino” o a colores rojizos y ocres sobre los espeleotemas debido a la oxidación (Figura 24B).

Aunque se cataloguen los espeleotemas existen combinaciones entre estos generando diferentes formas, la combinación más común es la unión de la estalactita con la estalagmita formando una columna, estas formas de goteo se pueden combinar con flujos, generando cortinas o banderas junto con estalactitas que pueden resultar también en columnas combinadas, en las columnas que son más anchas existe mayor superficie para la circulación de agua, causando una abundancia en las rocas de flujos, en algunos casos restringiendo el paso por la unión de varias columnas junto con coladas y cortinas (Figura 24).

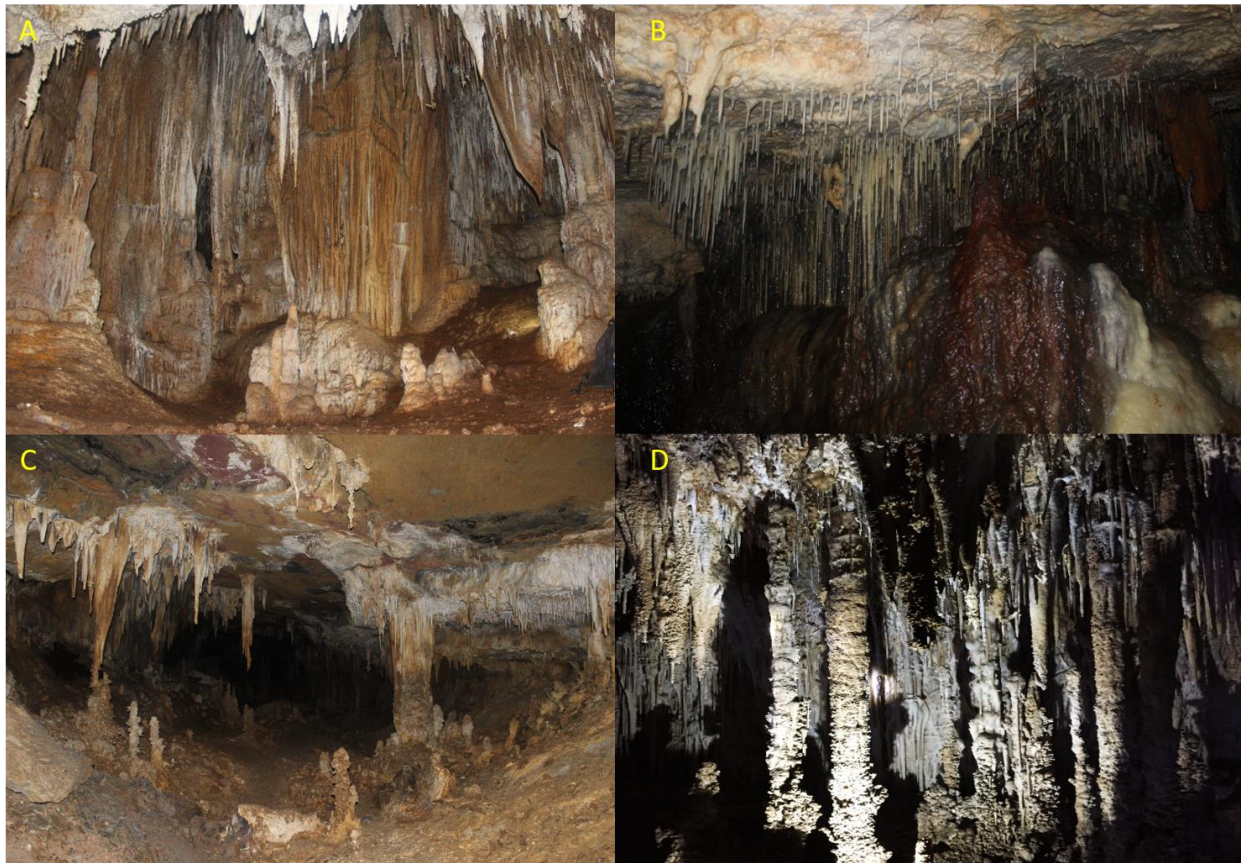


Figura 24. A) Conjunto de Cortinas, Estalagmitas y Estalactitas Formando Columns. B) Conjunto de Estalactitas, Pajillas de soda y coladas con coloraciones rojizas y pardas. C) Banderas junto con estalactitas y columnas. D) Estalactitas, Estalagmitas, Cortinas y columnas, estas últimas con presencia de coraloides.

Los cambios o eventos fluviales y deposicionales en las cavernas quedan marcados en unos espeleotemas pavimentarios generados cuando esta entra en un proceso de fosilización, ocurre una sedimentación hasta cierto nivel donde se genera una placa adherida a las estalactitas o columnas cuando los sedimentos son erosionados la placa queda en el aire como si fuera una repisa o estante, el goteo y la precipitación continúa resultando en nuevos espeleotemas (Figura 25). Estas repisas en algunos casos tienen un flujo de agua por la superficie generándose coladas en los bordes de esta (Figura 25D); Otra forma similar son las rocas de borde generadas en pozos

de agua estancada, similar a los andenes, son placas de calcita adheridas a los bordes de las coladas o columnas presentes.

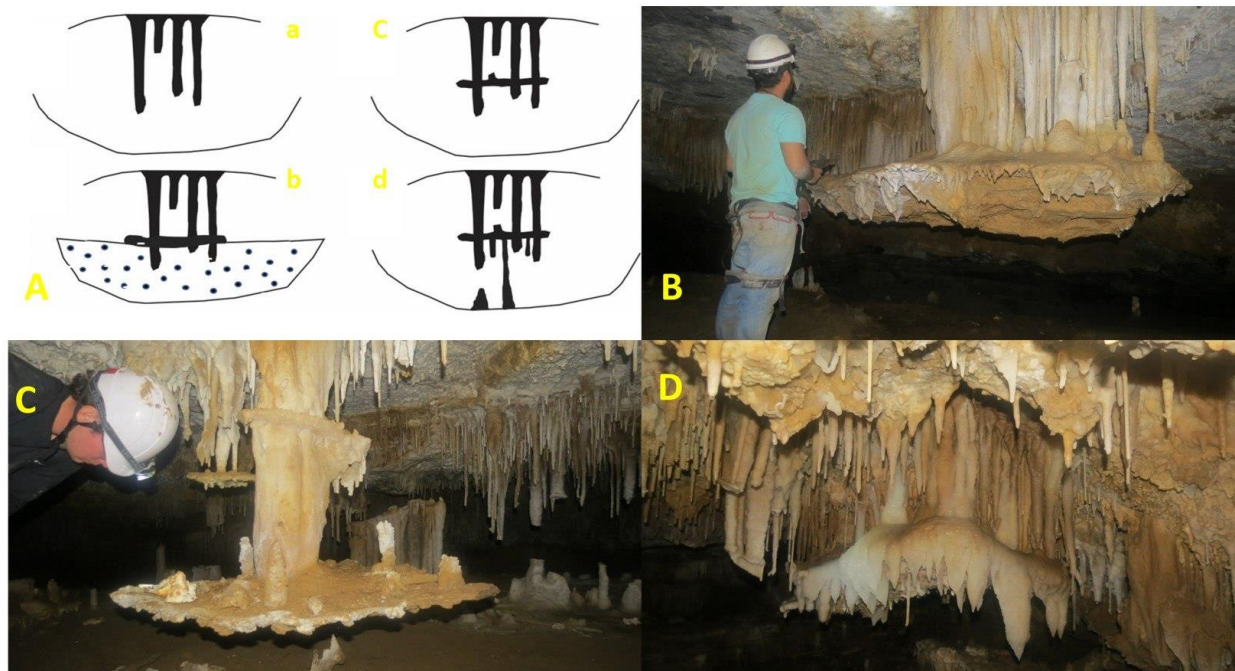


Figura 25. Espeleotemas combinados. A) Proceso de generación de la repisa y continuación del crecimiento de espeleotemas sobre y a través de esta. B) Repisa asociada con estalactitas y cortinas. C) Dos niveles de repisa que indican diferentes alturas de sedimentación en el salón. D) Repisa asociada a estalactia con crecimiento de coladas.

Otros espeleotemas: las formas cenitales tienen una variedad especial denominada cabeza de ducha (Figura 26A), la cual generalmente expulsa agua en ciertos momentos existirá precipitación y cuando esta forma ya haya crecido además de caer agua fluye agua por el espeleotema agregando calcita a la ducha y haciéndola más grande, en la caverna está presente en el primer piso. La forma pavimentaria generada por esta caída de agua es la bañera en este caso constituida o generada por gours y microgours. Las rocas de flujo en algunos salones están

compuestas de aragonito con crecimiento de espeleotemas con hábitos tabulares y aciculares. Hacia las galerías finales del segundo de nivel de la caverna existe precipitación de manganeso en forma de pirolusita sobre las estalactitas y cortinas (Figura 26B).

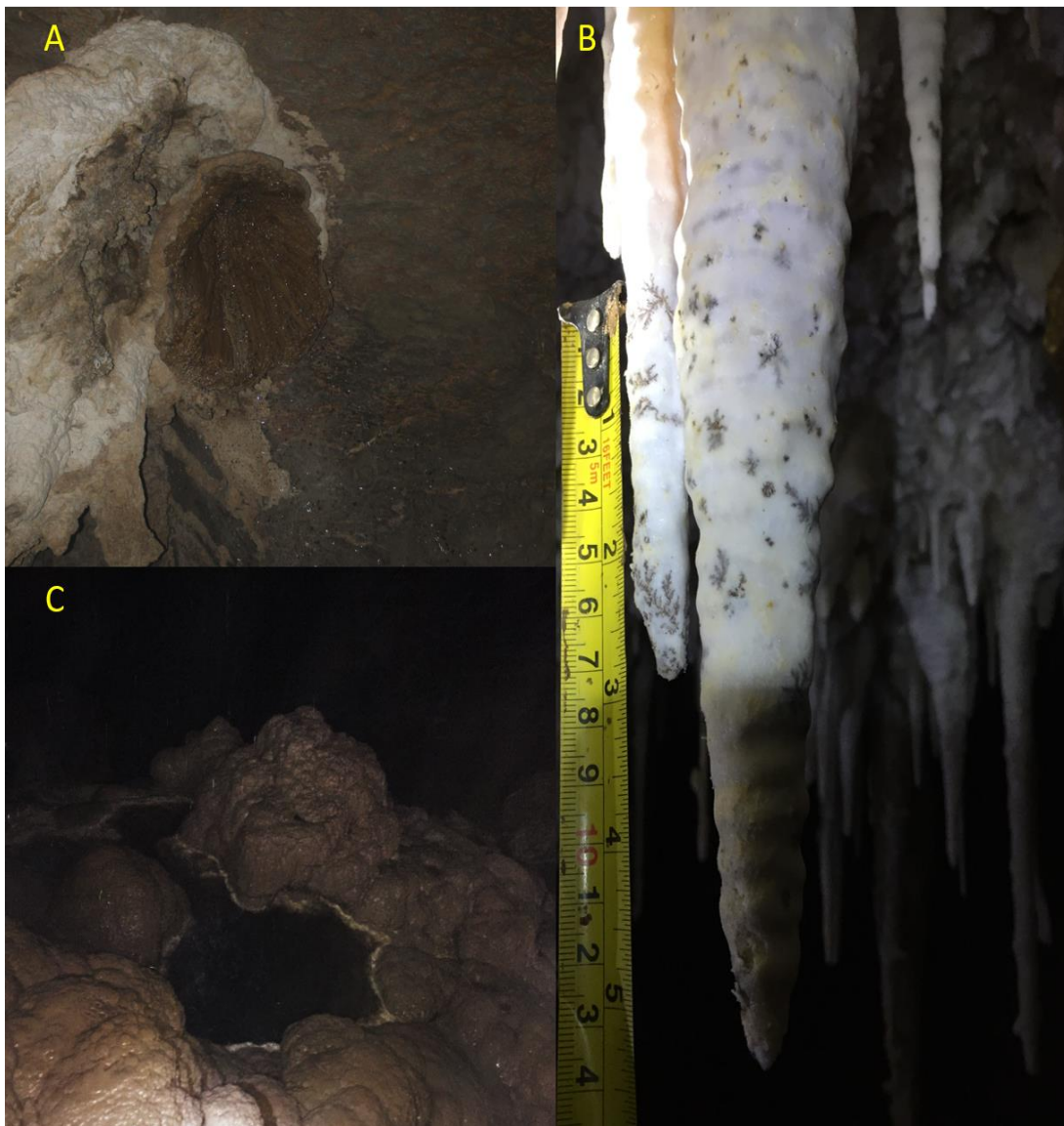


Figura 26. A) Cabeza de Ducha B) Estalactita de calcita con pirolusita dendrítica precipitada sobre esta. C) Bañera compuesta de gours y microgours.

Sulfatos: en el segundo piso existe una galería con presencia de espeleotemas que indican condiciones secas en la caverna, son formas parietales o en algunos casos pueden llegar a ser cenitales compuestas de yeso en agujas y resultando en forma de flor (Flores de Yeso), las coladas ubicadas junto a la flor también son sulfatos de calcita o podría presentar anhidrita en hábitos fibrosos (Figura 27).

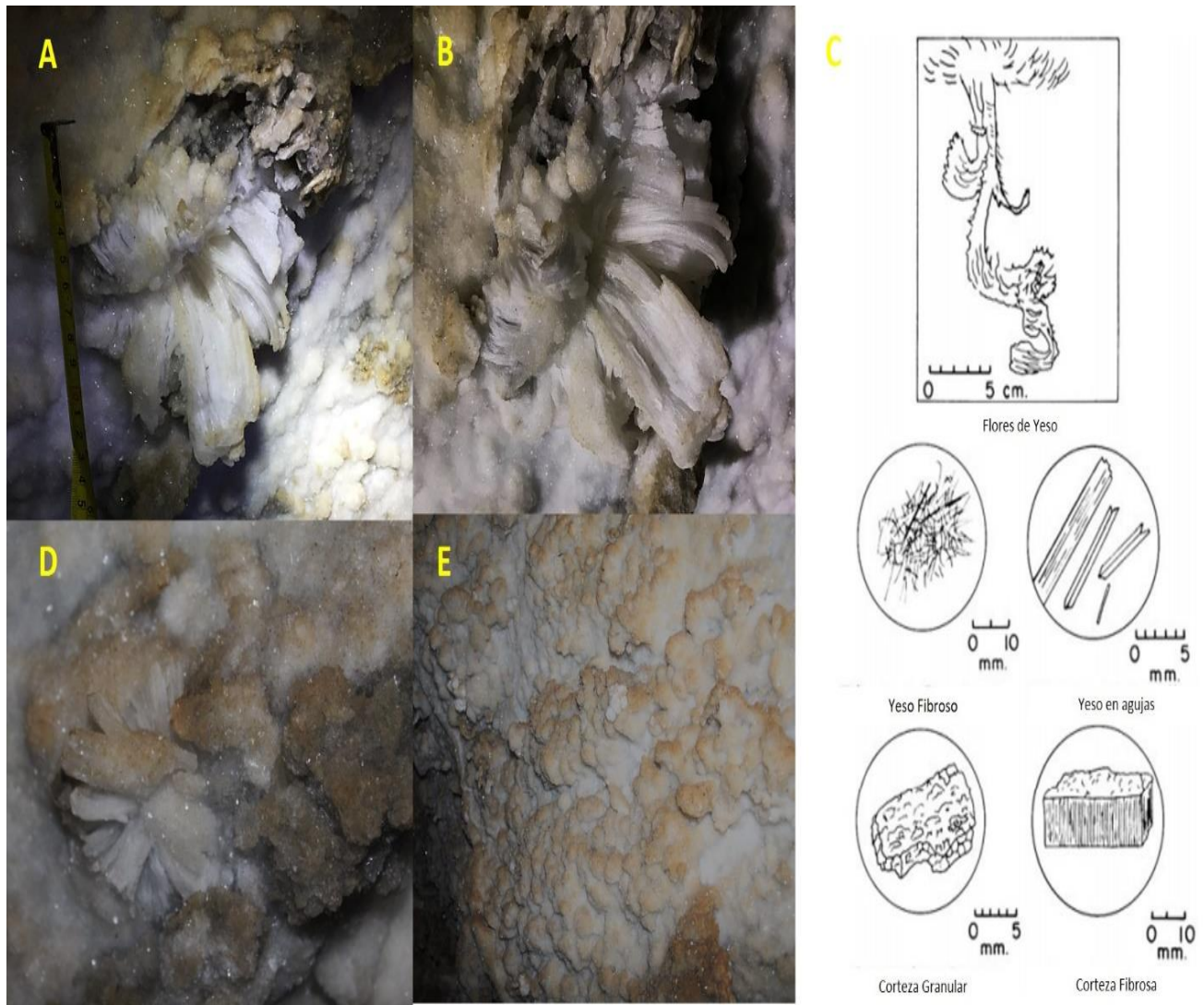


Figura 27. Espeleotemas de yeso. A-B) Flores de yeso. C) Esquema de las formas de crecimiento del yeso, tomado de White, 2017. D) Flor de yeso de menor tamaño. E) Espeleotemas parietales de yeso.

6.2.3 LIG 3: Cueva del Oro: La cueva se desarrolla al final de un valle de dolinas (Figura 28), constituida por un nivel predominantemente horizontal con diferentes ramificaciones, durante el recorrido parte de esta fue cartografiada (430 metros) con una descripción de sus espeleotemas, mineralogía y formas de vida encontradas (bioespeleología) y otros 200 m recorridos donde se registraron principalmente la orientación de sus pasajes para el posterior análisis estructural.

Se registra un desarrollo de 630 m para esta cueva, pero su extensión es mucho mayor. La cavidad es atravesada por una corriente principal de agua con dirección SW-NE (Figura 29). Este geotopo presenta valores medios en todos los intereses, siendo levemente mayor el interés científico, a pesar del nulo conocimiento científico del lugar (no hay trabajos publicados del lugar). El riesgo de degradación es bajo y su índice de sensibilidad de 0.61 la clasifica como considerablemente sensible a la degradación antrópica.



Figura 28. Entrada Cueva del Oro. A) Valle de dolinas que termina en la cueva. B) Dolina donde finaliza el valle, presenta una sima que por su predominio vertical y abundante vegetación ha impedido su exploración. C) Entrada a la cueva.

Los espeleotemas son abundantes y diversos en cuanto a su forma, composicionalmente están formados de carbonatos con variaciones e impurezas. Varias galerías de la cueva están generadas por la erosión-disolución que ejerce el caudal sobre la roca caja, también hay formas deposicionales fluviales, estos aspectos dan indicios de la actividad que ha tenido el caudal. Sobre la quebrada se toman datos a sus aguas, arrojando pH: 8,5, TDS: 107 y la temperatura: 17,2°

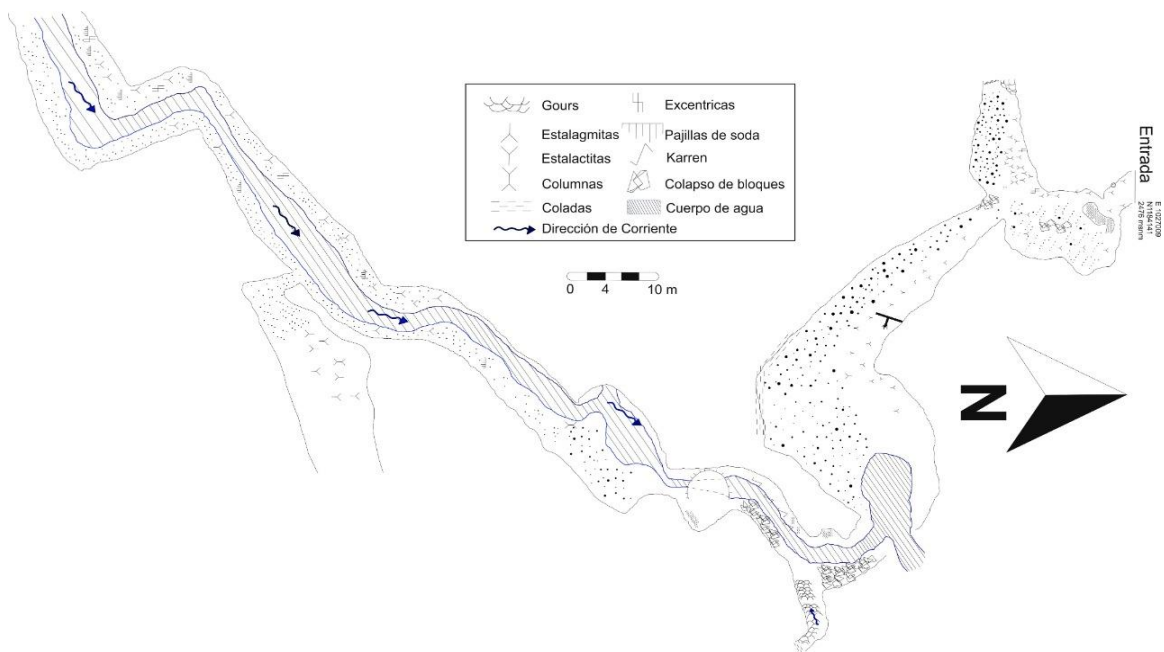


Figura 29. Mapa geoespeleológico preliminar de la Cueva del Oro.

Espeleotemas de Carbonatos: El mineral más común es la calcita con variaciones a aragonito presentes en algunos niveles o conformando el espeleotema completo, en algunos casos con una variedad de aragonito de colores azulados. La siderita y magnesita aparecen en niveles de algunos espeleotemas en algunos casos ya presentes como óxidos de hierro o magnesio.

Los espeleotemas generados por goteo están presentes durante toda cavidad, en términos de cenitales la variedad de estalactitas es amplia difieren en los tamaños (Figura 30A) y tonalidades debido a la predominancia de calcita y algunos niveles de siderita o magnesita, estas se presentan en variedad de pajillas de soda con abundante aparición en las últimas galerías compuestas de aragonito y/o calcita (Figura 30A), algunas en especial compuestas total o parcialmente por aragonito azul (Figura 30B). La variedad de las excéntricas no es tan amplia como en los carracos, pero en ciertos lugares si hay abundancia de estas, algunas antoditas crecen sobre las columnas o cortinas (Figura 30C), con las pajillas de soda hay excéntricas asociadas de composición similar aragonito, aragonito azul principalmente. Las estalagmitas se presentan en la mayoría de los salones y galerías, pero en las que se observa actividad del caudal se reduce la abundancia de estas.

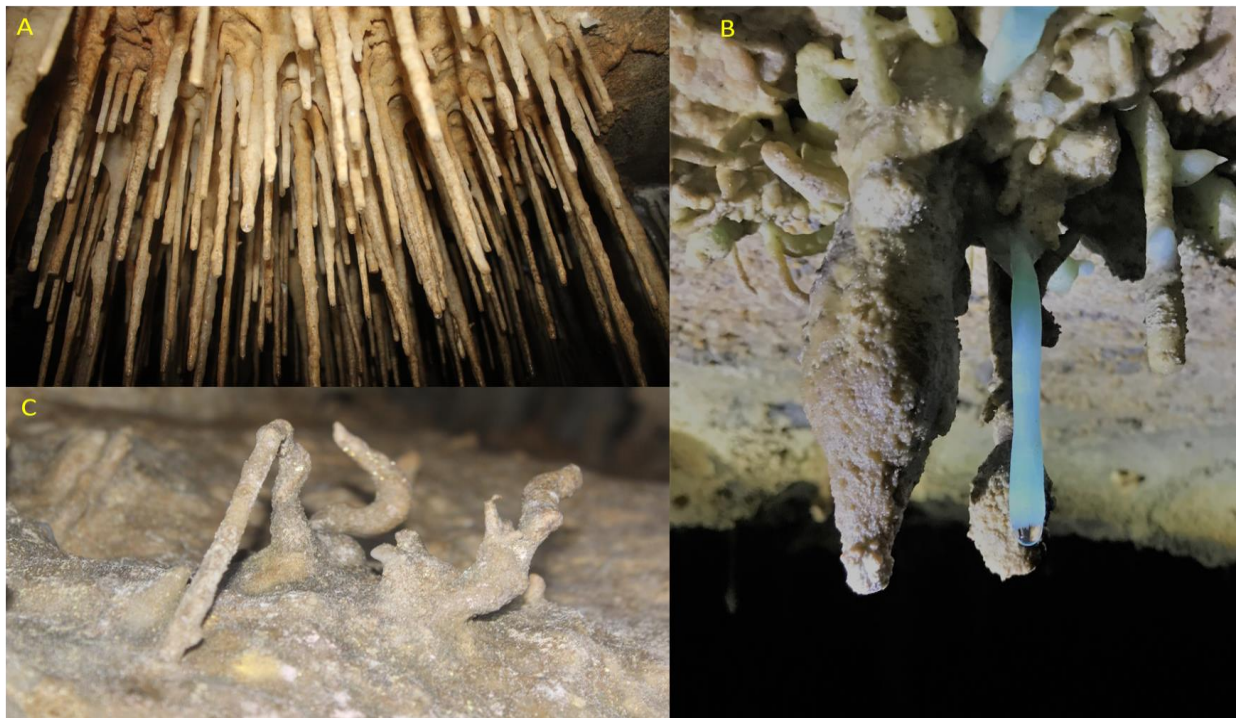


Figura 30. A) Estalactitas y pajillas de soda en crecimiento activo. B) Pajilla de soda azul y helictitas creciendo a partir de estalactitas de calcita. C) Excentricas de aragonito.

Los flowstone se dan en las paredes de la caverna conformados de calcita, aragonito en algunos casos, niveles de siderita o magnesita, en lugares puntuales hay impurezas en la calcita o en el aragonito con tonalidades azuladas-verdosas. Las cortinas y banderas se combinan con las estalactitas mostrando las variaciones similares en cuanto a composición mineral (Figura 30A), estas combinaciones pueden resultar en columnas, así como sucede con las estalactitas y estalagmitas simples, las columnas pueden estar compuestas de cortinas, banderas o flowstone agregándole tamaño y volumen a esta (Figura 31B-C).

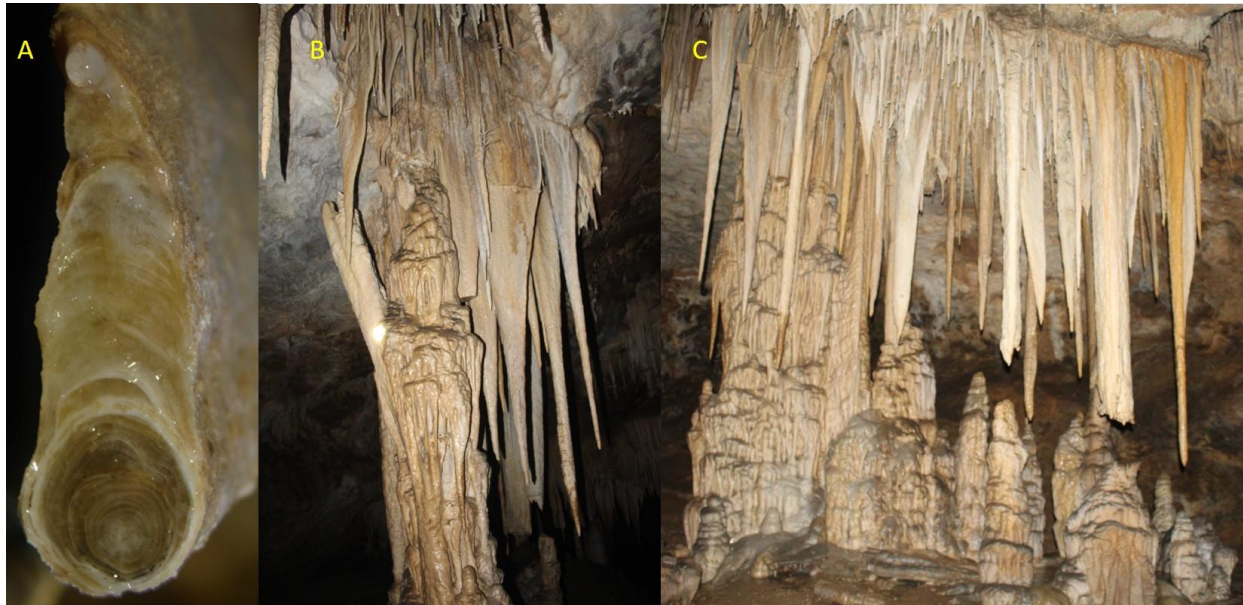


Figura 31. A) Crecimiento de un flowstone junto a una estalactita, variación en los niveles entre siderita-Magnesita y Calcita. B) Cortinas combinadas con estalactitas y columnas. C) Combinación de estalagmitas, estalactitas, cortinas, banderas y columnas.

Otras formas pavimentarias también pueden combinarse combinarse junto con columnas, estalactitas o estalagmitas formando repisas de calcita (Figura 32A), los gours y microgours de calcita se generan en abundancia en sectores donde hay surgencia generando piscinas o bañeras

(Figura 32B). La forma cenital conocida como cabeza de ducha es compuesta de calcita y en este caso no tiene una bañera debajo, cae al caudal que circula en la caverna (Figura 32C).



Figura 32. Formas endokársticas. A) Repisa asociada a una columna con crecimiento posterior sobre esta de estalagmitas y cortinas del techo. B) Piscinas constituidas por gours y microgours debido a una surgencia. C) Cabeza de Ducha con bañera asociada.

Bioespeleologia: En esta cavidad se encontraron distintas formas de vida, entre las que destacan crustáceos (Figura 33.A), en la corriente de agua que atraviesa la cavidad, en la zona de la entrada predominan arácnidos (Figura 33.B). También se encontraron opiliones de la familia Cranidaae (Figura 33.C) y un individuo de Scolopendromorpha.

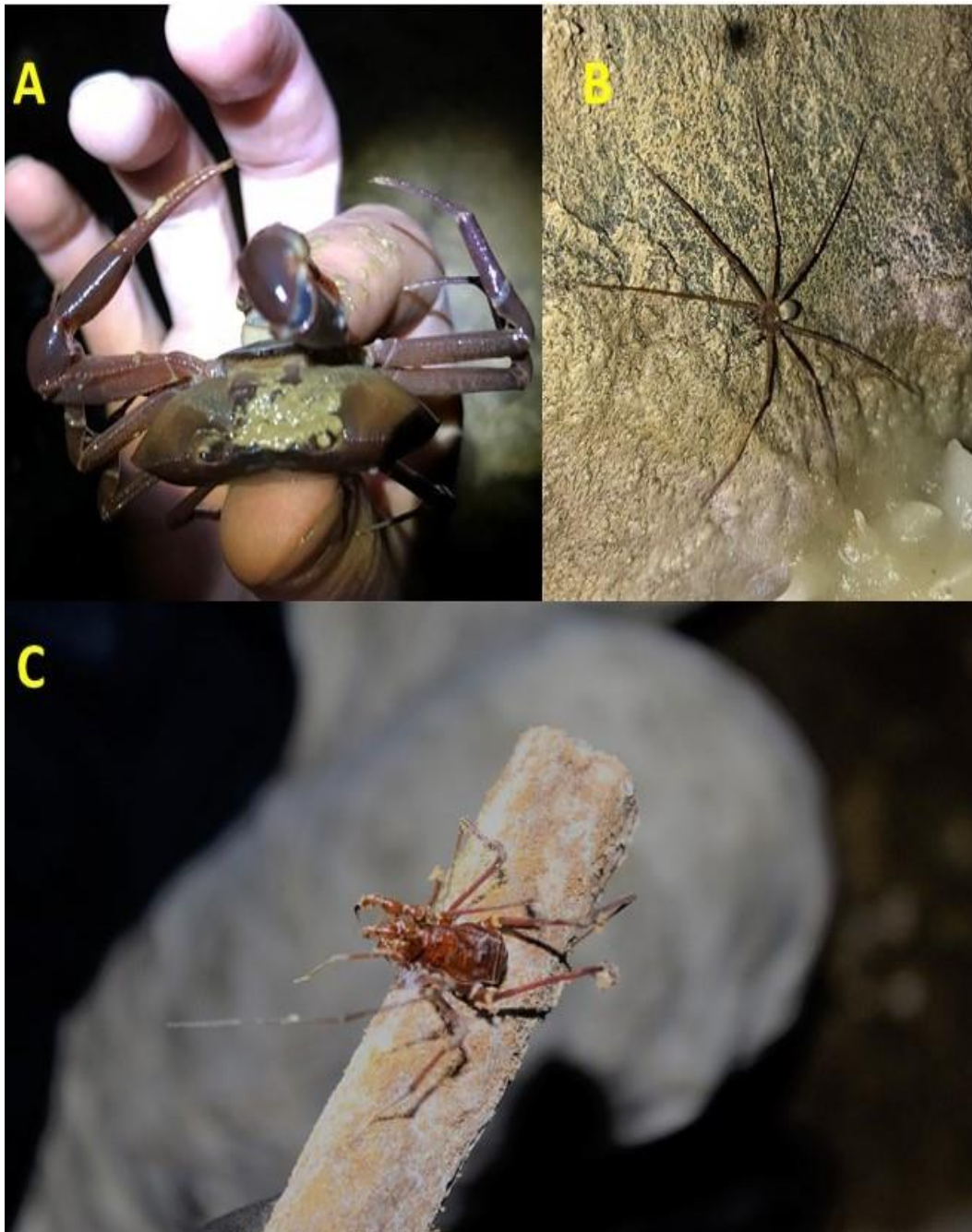


Figura 33. Bioespeleología en la cueva del oro. A) Orden Crustacea. B) Pisauridae (Araneae). C) Cranidae (Opilion).

6.2.4 LIG 4: Caverna La Tronera: La Caverna La Tronera se encuentra en la vereda san pablo al NE del municipio de El Peñón. Presenta un desarrollo de cerca de 1.3 km con dos entradas, una vertical a través de una sima, y una entrada horizontal bastante amplia por donde hay que atravesar un camino de bloques bastante grandes y angulosos producto del colapso del techo de la caverna, con sedimentos de inundación depositados sobre estos, la entrada horizontal a la caverna se abre debido a que baja el nivel piezométrico dejando de estar inundada.



Figura 34. Mapa geoespeleológico de la Caverna La Tronera. Adaptado de Hapka et al., (2015)



Figura 35. Entrada de la Caverna La Tronera. A. Vista desde la entrada al exterior de la caverna, se puede observar la gran cantidad y tamaño de bloques angulares en el piso. B. Vista desde el exterior de la caverna.

Una dolina de colapso o sima ubicada a unos 700 metros de la entrada constituye su principal atractivo, con una altura de cerca de 130 metros y un diámetro de aproximadamente 25 m, simulando su forma en planta a la de un corazón, por lo que se ha denominado esta geoforma por la comunidad local como “el corazón del mundo” (Figura 36). Cerca de la sima hay una entrada pequeña donde se llega a una quebrada o río subterráneo que tiene una dirección SW-NE.

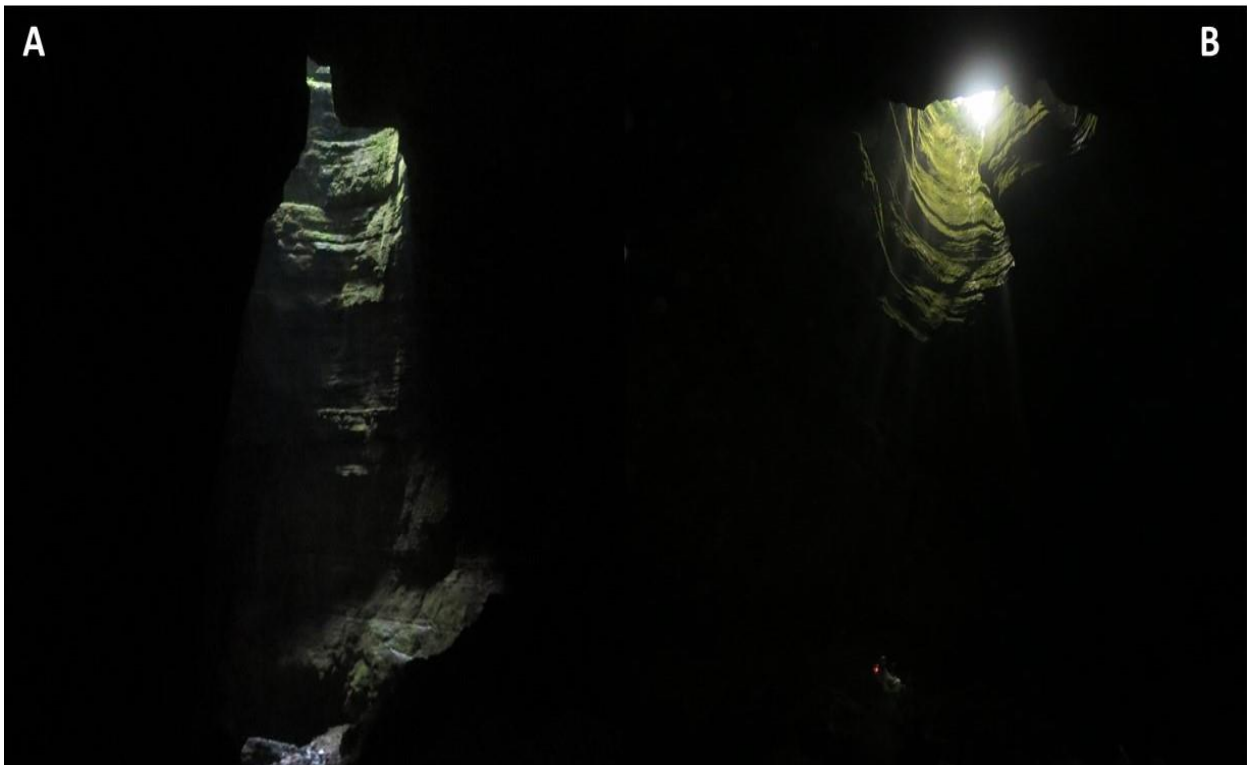


Figura 36. Dolina de colapso “El Corazón del Mundo” A. Caída de cerca de 130 metros B. Forma de corazón de la sima. Los puntos en la parte inferior corresponden a personas.

Este es un geotopo de valor medio en los tres intereses, con un mayor interés turístico. La alta susceptibilidad a la degradación antrópica está relacionada con la vulnerabilidad al expolio que tiene el yacimiento paleontológico encontrado en su interior, a pesar de que el acceso a este punto para turistas es casi nulo, para locales e individuos con fundamentos de espeleología no lo es. La cavidad presenta un índice de sensibilidad de 0.55 que la clasifica como sensible a la degradación antrópica. El interés principal es geomorfológico debido a las dimensiones y la forma de la sima, presenta un interés secundario paleontológico debido a los hallazgos que ya se han hecho pero este interés podría ser el principal debido a que en esta geoforma es una trampa para los animales favoreciendo la posible abundancia de fósiles en el fondo de esta, el interés hidrológico también es relevante debido al caudal continuo que pasa por la cavidad (Figura 37).



Figura 37. Quebrada subterránea en la caverna.

Bioespeleologia: La especie que más destaca son los guacharos (*Steatornis caripensis*), conocidos como “carracos” por la población local, se encuentran ubicados en las partes más altas de la entrada de la caverna. En la zona de la quebrada subterránea se pueden encontrar múltiples individuos de arácnidos y Campos et al. (2008) han reportado la presencia de crustáceos.

6.2.5 LIG 5: “La ciudad del karst (Karst Town)”’: Ubicado en la margen izquierda de la vía El Peñón – La Hermosura aproximadamente a 12km del municipio. Cuenta con una extensión de cerca de 3 km², donde el atractivo paisajístico son las distintas formas esculturales de karren que se pueden encontrar, con algunas expresiones de hasta 6 m de altura. El desarrollo de los campos de lapiaces por la ladera del valle de dolinas asemeja a una ciudadela de roca un poco laberíntica dándole un atractivo paisajístico muy alto. En la roca expuesta en los lapiaces algunos estratos tienen contenido fosilífero como bivalvos, gasterópodos y equinodermos. La accesibilidad, visibilidad, y tamaño de este geotopo son ventajas muy marcadas para apreciar todos los rasgos de interés que este tenga.



Figura 38. Karst Town. A) Valle de dolinas alineado con el karren al fondo bordeando las depresiones. B) Megakarren de 6 m de altura. C) Belleza paisajística del lugar. D) Mesokarren.

Este geotopo presenta valores medios para todos los intereses, presentando un mayor interés científico y didáctico. Su riesgo de degradación es prácticamente nulo debido a su extensión y a su difícil deterioro. El interés Principal es el geomorfológico debido a la variedad y comportamiento de las geoformas apreciadas con un interés secundario sedimentológico en las cuencas endorreicas que son las dolinas o los valles de dolinas.

6.2.6 LIG 6: Cueva Casa de la Virgen: Ubicada en cercanías al municipio, al margen izquierdo de la vía El Peñón-Las Cruces sobre el km 3 aproximadamente. Actualmente constituye un sitio donde algunas personas del municipio y otros municipios vecinos profesan su fé haciendo un acto de peregrinación a esta principalmente en fechas importantes para la fé católica como la semana santa. Junto a su entrada se encuentra una surgencia que indica la presencia de un aparato kárstico activo en este macizo, con sus aguas claras también ha constituido un atractivo turístico para algunas de las personas que visitan el lugar.



Figura 39. Cueva Casa de la virgen. A) Escarpe donde se genera la gruta. B) Altar a la virgen dentro de la gruta. C) Surgencia de agua a un costado del escarpe. D) Vista desde la gruta.

Este geotopo presenta un mayor interés científico y turístico, destacándose el potencial para el desarrollo de actividades de espeleoturismo religioso. La susceptibilidad de degradación de la gruta por efecto antrópicos es considerable debido a la tradición religiosa de visitar el altar. El interés Principal es el Estratigráfico por el trabajo ya realizado en este punto (Gómez et al., 2008) y por la exposición de más de 150 m de la Formación Rosablanca, el interés hidrológico es secundario debido a las surgencias de agua que posee el macizo dando indicios de una circulación de caudal amplia con posible uso potable facilitando una de las necesidades básicas para la comunidad rural.

6.3 Geoconservación

Prácticas de Geoeducación con habitantes del municipio de El Peñón fueron llevadas a cabo con el apoyo de miembros del Semillero de Investigación en Patrimonio Geológico de la Universidad Industrial de Santander. En ellas, especialmente con jóvenes de escolaridad primaria se desarrollaron talleres prácticos con las temáticas de: fósiles, creación de montañas, minerales, cuevas y geografía. Durante su desarrollo los jóvenes pudieron indagar acerca de temas geocientíficas de interés que actualmente no se encuentran contemplados en los currículos escolares de sus instituciones educativas. Los temas por los que más indagaron los participantes fueron:

- La formación e importancia de las cuevas, comprensible por la riqueza en cavidades subterráneas que presenta el municipio.
- La minería. Tema bastante sensible ya que la población se ha opuesto rotundamente al desarrollo de proyectos mineros que se han planteado en la zona, con las razones del cuidado de su riqueza hídrica y subterránea, lo que muestra que la población reconoce la riqueza con la que cuenta su territorio, y este patrimonio natural ha llegado a generar identidad en sus habitantes.



Figura 40. Prácticas de Geoeducación en la biblioteca municipal. A) Jóvenes participantes del taller. B) Taller de fósiles. C) Taller de minerales. D) Taller de Geografía. E) Taller de formación de montañas.

Los guías locales que acompañaron el trabajo espeleológico de este proyecto fueron pieza clave para el desarrollo del mismo, donde se tuvo la oportunidad de compartir conocimientos geocientíficos y material didáctico (mapas, muestras), que se espera sean la base para el inicio de prácticas de Geoturismo en la zona.

6.4 Análisis Mineralógico

La precipitación en los ambientes endokársticos comúnmente genera o cristaliza en carbonatos, en la zona de estudio varía entre los polimorfos de calcio, algunos enriquecimientos de Fe, Mg y trazas de Ti, Os, Zn o Cu y diferentes alteraciones debido a la meteorización del agua.

6.4.1 Calcita: La calcita primaria aparece en forma de fábrica columnar paralela o sub paralela, elongada y compacta o abierta, en algunos casos esta fábrica puede recrystalizar y terminar en calcita microcristalina (Figura 41A) o formar cristales emplumados. Esta calcita también puede tener fabrica columnar de variedades fasciculares o aciculares elongadas, relacionadas más a procesos diagenéticos (Figura 41B). Esta fábrica aparece en todos los espeleotemas analizados en niveles relacionados a calcita primaria o diagenética, los coraloides también presentan está fabrica (Figura 41C) siendo de mucho más reciente crecimiento que el núcleo de la estalagmita o estalactita.

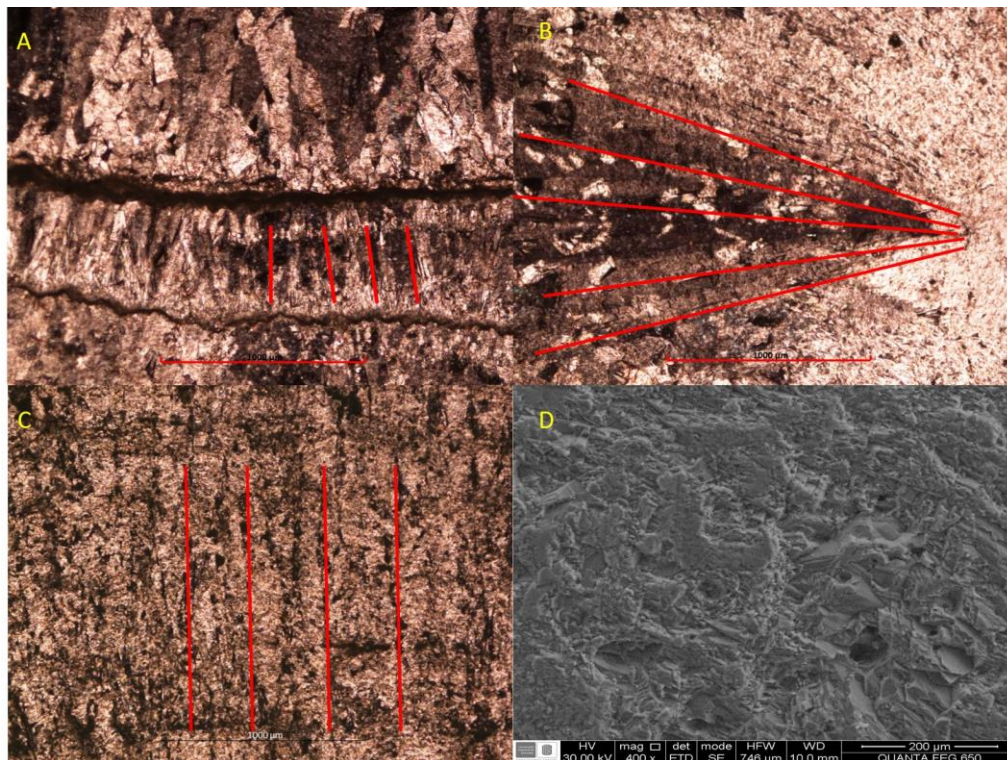


Figura 41. A) Calcita Columnar recrystalizando en variedad microcristalina, con superficies de erosión que contienen micrita y detritos (FlowStone). B) Calcita columnar acicular asociada a recrystalización a partir de cristales de aragonito (FlowStone). C) Calcita columnar abierta y paralela recrystalización en variedad microcristalina (Coraloide). D) Imagen SEM de un coraloide que muestra aun las caras de cristales columnares y convertida en calcita microcristalina.

6.4.2 Aragonito: El aragonito tiene un fabrica acicular o fibrosa que en algunos casos llega a ser en forma de rayos, está presente en diferentes espeleotemas de la caverna los Carracos y la Cueva del Oro, en la caverna de los carracos conforma en su totalidad una estalagmita la cual ha sido recrystalizada totalmente en calcita columnar en forma acicular o fascicular, la recrystalización llega a avanzar tanto que la calcita termina en fabrica microcristalina, la disolución de estos cristales se ha dado también durante la diagénesis, al borde de los cristales disueltos se precipitan algunos óxidos de Fe y Mg.

En la Cueva del Oro el Aragonito presenta algunas coloraciones azuladas relacionadas a trazas de Zn o Cu probablemente, con un hábito tabular y/o acicular, mostrando direcciones de crecimiento diferente relacionadas con los cambios de tonalidad durante el crecimiento.

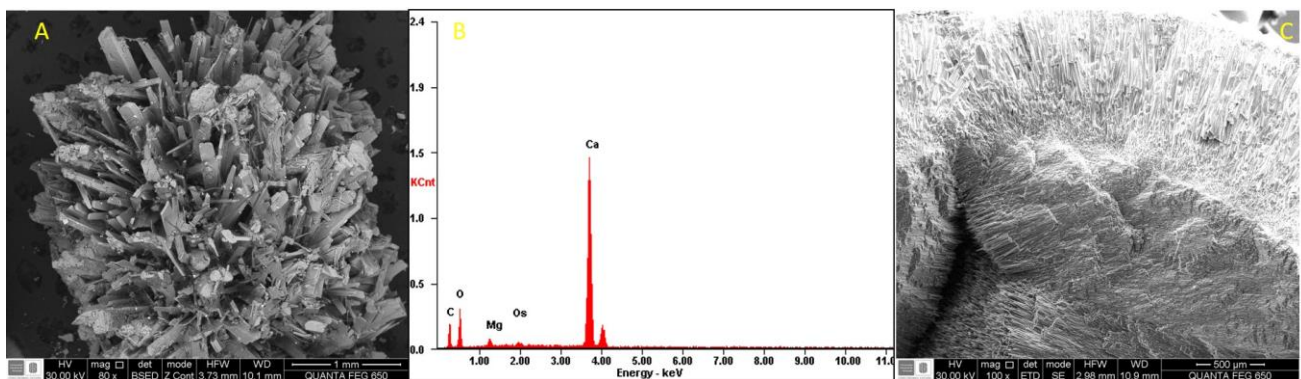


Figura 42. A) Aragonito parietal de la Caverna los Carracos. B) Espectro del Aragonito anterior, impurezas de Mg y Os. C) Aragonito Azul de la Cueva del Oro, notese las direcciones de crecimiento diferente en los dos niveles de crecimiento.

6.4.3 Siderita-Magnesita: Esta relación de minerales se encuentra en la Caverna la Tronera y la Cueva del Oro, evidenciada por los colores pardos o rojizos sobre los espeleotemas cenitales y parietales generados por la oxidación de estos, diferentes niveles de siderita y magnesita aparecen en las estalactitas o cortinas con colores ocreos o amarillentos de un menor espesor comparado con la calcita o el aragonito.

6.4.4 Micrita y detritos: Algunos espeleotemas son más sensibles a los cambios en el nivel piezométrico, generando ciertas superficies de erosión o discontinuidades generalmente compuestas de detritos; en los flowstone y en algunas estalagmitas estas superficies se presentan en diferentes espesores y cantidades, indicando la intensidad y durabilidad del evento que genera los detritos. En la Cueva del oro se encuentran unas partículas en un pozo pequeño que muestran poco transporte, pero alta meteorización por la circulación de agua, estas partículas son de malaquita debido a la alteración que ha generado el agua sobre la calcopirita presente en la roca caja (Figura 43).

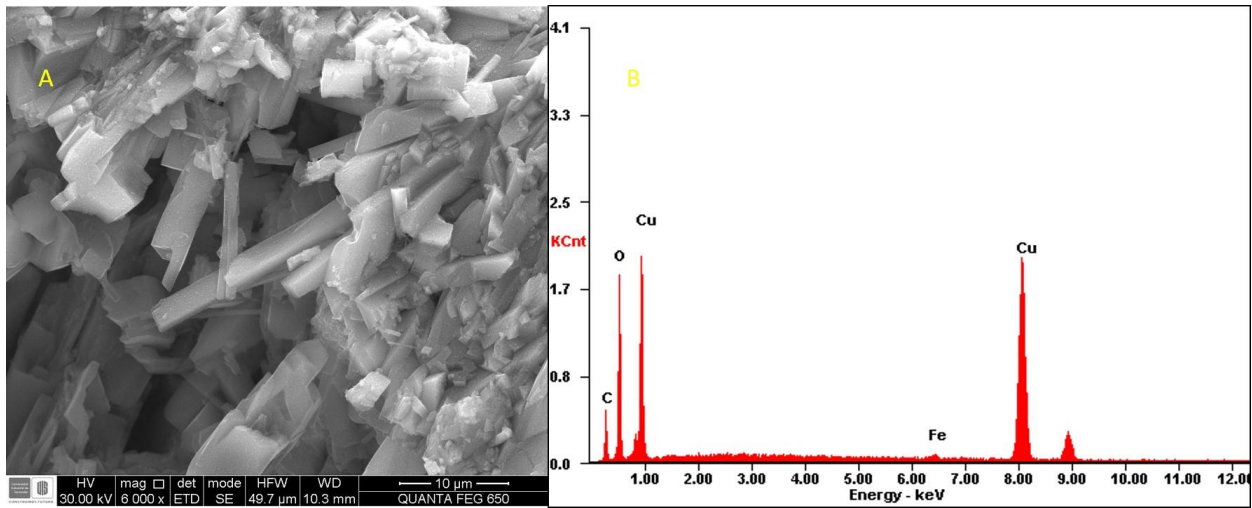


Figura 43. A) Cristales de Malaquita asociados a la alteración de la calcopirita. B) Espectro de la Malaquita.

6.4.5 Yeso: Los minerales de Yeso se encontraron en la Caverna los Carracos, en un salón en específico de la galería inferior o segundo piso, en las flores de yeso se presentan en agujas formando una corteza Fibrosa, en las coladas de este salón se da en forma fibrosa produciendo Corteza Granular.

6.4.6 Calcedonia: La calcedonia se presenta en la Caverna de los Carracos y la Cueva del Oro, se da mediante la alteración específicamente silicificación de la calcita, en la estalactita la alteración se da por los planos generados debido a la exfoliación que tiene la calcita causando una especie de relieve en la calcedonia, en la estalagmita coraloide también se presenta la calcedonia en menor abundancia localizada en el cambio de la calcita columnar abierta y microcristalina.

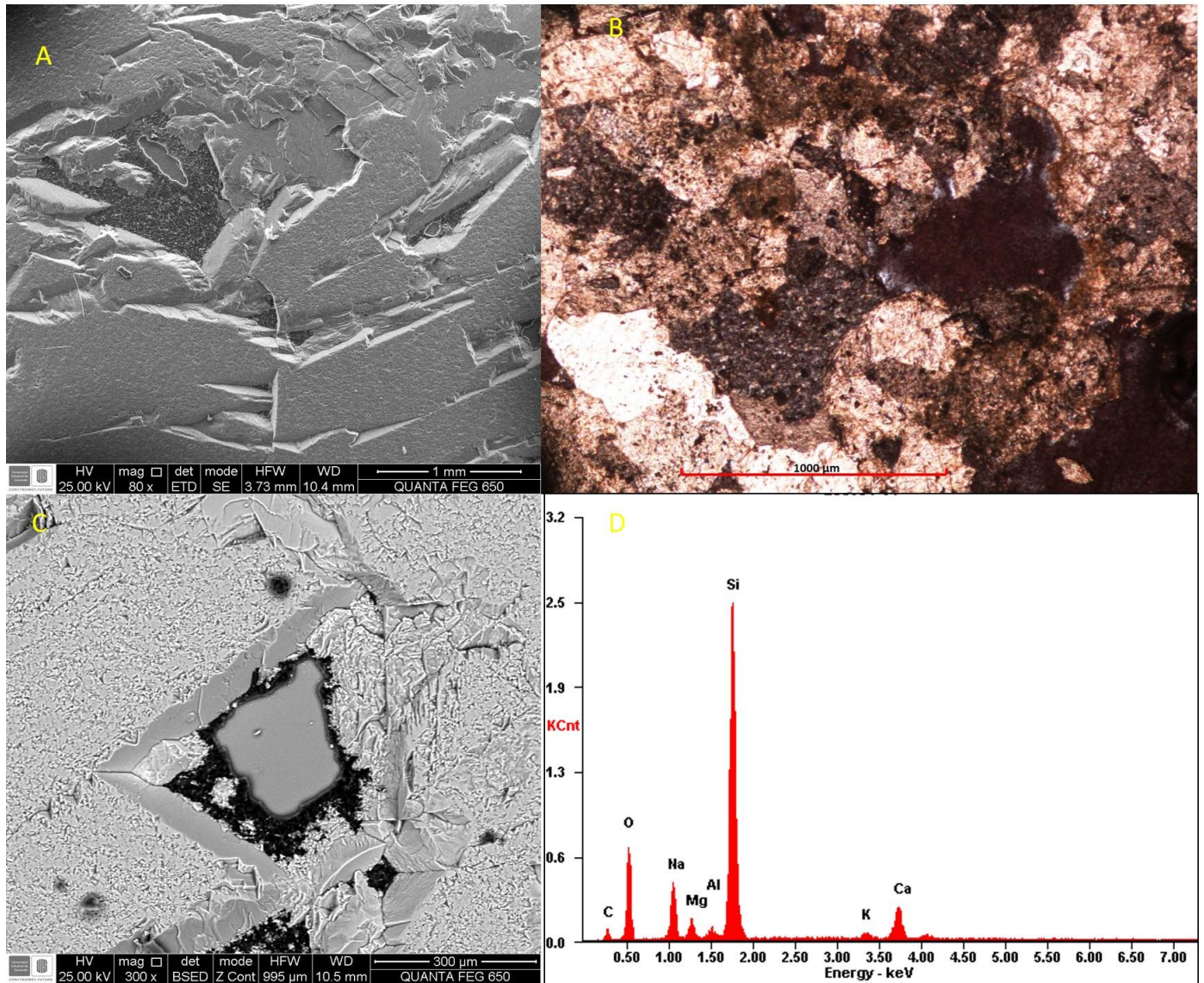


Figura 44. A) Imagen SEM de la estalactita de los carracos, alteración (Silicificación) de la calcita en las caras dadas por la fábrica columnar. B) Coraloide del Oro, calcedonia y calcita. C) Imagen SEM de la estalactita de los carracos, silicificación del centro hacia afuera del cristal de calcita columnar microcristalina. D) Espectro en el centro de la alteración.

6.4.7 Introducción Ontogénica: Los espeleotemas analizados brindan una introducción de la ontogenia mineral de cada caverna y la posible relación o similitud que exista entre estas, los cristalitos están dados por cristales individuales de aragonito, calcita o de yeso en algunos casos puntuales como en los carracos, en la mayoría de los casos la calcita es encuentra dividida o algunas pocas veces creciendo en forma de esqueleto (más en sus bordes que en sus caras); los agregados característicos para los espeleotemas pueden ser: columnares-paralelos si se refiere a niveles de calcita primaria como ocurre en la estalactita donde este espeleotema completo está definido por el agregado. El flowstone presenta varios niveles con agregados paralelos-columnares (calcita) y agregados fibrosos radiales (aragonito), estando dentro del mismo orden este espeleotema estaría compuesto por multiagregados híbridos.

La estalagmita-coraloide estaría compuesta de dos agregados el primero paralelo columnar y el segundo un agregado ramificado de coraloideas, la combinación de estos agregados resulta en multiagregados politexturales de calcita. Otros espeleotemas como la estalagmita conformada de aragonito ya recristalizado se puede asociar a un agregado fibroso radial, las pajillas de soda y helictitas analizadas, así como las coladas también se asocian a este mismo agregado de aragonito. Para los minerales de yeso como las flores y las coladas se les atribuye un agregado fibroso conformando todo el espeleotema o multiagregados politexturales que marcan el cambio de crecimiento de los cristales de yeso.

7. Discusión

A pesar de que la caliza presenta valores bajos de porosidad y permeabilidad, la mayoría de las cuevas kársticas presentan flujos importantes de agua subterránea. Esto se debe a que la mayor parte del agua que se infiltra en la roca se mueve a lo largo de las discontinuidades estructurales presentes en la misma (planos de estratificación, fracturas, fallas). “Las estructuras frágiles activas o potencialmente activas influyen el flujo del agua subterránea, por lo que es razonable esperar que ellas también influyan la formación de los pasajes de cuevas solucionales” (Littva et al., 2015, p. 52). Debido a esto las unidades de la zona endo y exokársticas generadas están orientadas en direcciones NE-SW y NW-SE, dos direcciones preferenciales perpendiculares entre sí, una de estas direcciones es subparalela a las estructuras plegadas regionales y locales. Los diagramas rosa de las fracturas muestran estas 2 direcciones preferentes junto a otras de menor abundancia lo cual explica las variaciones en las orientaciones de las unidades Kársticas; Gómez et al., 2008 calcula una elipse de deformación para la región de los anticlinales los portones-los medios- los cobardes con un tensor en dirección NW-SE a 142° , la dirección del tensor obtenida es la misma con una variación en el ángulo a 146° , este cambio leve se da por la diferencia en la escala y el detalle manejado.

Las concentraciones anómalas de las formas generadas en las cavernas están ligadas a concentraciones que posee la roca caja, si bien en ambas cavidades se observan anomalías, en la cueva del oro se encontró un aporte mayor de un elemento debido a que los espeleotemas adquieren colores azulados o verdosos y se encuentran partículas alteradas a malaquita en pequeñas piscinas, la cueva del oro está más cerca de la zona de concentración anómala de cobre donde su caudal está lixiviando minerales como pirita, calcopirita enriqueciendo las aguas ácidas en metales para su posterior deposición en este sistema. Huff (1940) mediante demostraciones experimentales encontró que la curvatura de los pétalos de las flores de yeso son el resultado de

un crecimiento más rápido de un lado que del otro, debido a que en el centro de la flor el suministro es mayor que en los pétalos.

8. Conclusiones

Las fracturas tensionales definen la ruta subterránea preferencial del agua, causando las orientaciones de las principales estructuras endo y exokársticas de la zona, las cuales están relacionadas al régimen de esfuerzos prominente en la zona, con un tensor de 136° que genera tanto los pliegues locales como los pliegues y las fallas regionales.

La galería inferior de la Caverna Los Carracos presenta una alta diversidad geológica y un alto valor científico, además de ser considerablemente sensible a perturbaciones antrópicas, por lo que se recomienda sea destinada principalmente para campañas científicas que pretendan ahondar en las distintas ramas de las Ciencias del Karst y aportar nuevos datos de este sistema (Biospeleología, Paleoclimatología, Hidrogeología, Mineralogía, Tectónica).

La cueva del oro presenta una gran diversidad de manifestaciones excepcionales de espeleotemas y minerales a lo largo del tramo cartografiado. Se recomiendan las actividades de exploración o turismo en esta cueva no excedan el límite cartografiado en este proyecto ya que por las condiciones espeleométricas de la cavidad el continuar implica la destrucción de espeleotemas excepcionales, afectando gravemente el estado prístino y los valores científicos y didácticos de esta cavidad.

Los geotopos Cañón de Panamá, Cueva Casa de la Virgen, Karst Town, Caverna La Tronera son propuestos para la implementación de prácticas de Geoturismo que logren aprovechar todo su potencial, generando conciencia geológica en todos sus visitantes.

El crecimiento de los cristales de los carracos y del oro tienen similitudes en cuanto a texturas y fábricas de los cristales, es decir agregados similares que llegan a conformar hasta el mismo tipo de espeleotemas en algunos casos, estas similitudes no indican eventos coetáneos, indican ambientes similares de cristalización en diferente tiempo y espacio. Variaciones en la composición de los espeleotemas de las cavidades está marcada por el aporte de la roca caja en impurezas como Fe, Mg, Mn, Cu, Ti y Os, la cueva del oro presenta la mayor abundancia en impurezas registradas en los espeleotemas y en los clastos encontrados en esta.

La presencia de especies como los crustáceos son indicadores del grado de conservación de estos ambientes subterráneos que se puede considerar se encuentran en un estado casi prístino.

La Geoconservación de lugares de interés geológico como la galería inferior de la Caverna Los Carracos, los cuales poseen un alto valor científico es una garantía para que futuras investigaciones con nuevas tecnologías y herramientas sean llevadas a cabo por nuevas generaciones de Geocientíficos, Biólogos, Antropólogos, entre otros profesionales de las distintas ramas del saber.

Es necesario el trabajo social con las comunidades, especialmente en la zona rural con los propietarios de los predios en donde hay manifestaciones subterráneas y potenciales geotopos. La capacitación e implementación de estrategias como el “Apadrina una Roca” diseñada por el Instituto Geológico y Minero de España, garantizarán la Geoconservación de este Patrimonio Natural.

Referencias Bibliográficas

- Alfonso, C. A. (1985). Los episodios evaporíticos de la Formación Rosablanca. Proyecto Cretácico. Publ. Geol. Esp. Ingeominas, No. 16, Cap. XVI, pp. 1-19. Bogotá.
- Allmendinger, R. W.; Cardozo, N. C.; Fisher, D. (2013). Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors: Cambridge, England, Cambridge University Press, 289 pp.
- Arattano, M.; Peppoloni, S.; Gatti, A. (2018). The ethical duty to divulge geosciences and the improvement of communication skills to fulfil it. Episodes Vol 41, No. 2.
- Bedoya, C.; Nomesqui, H. (2013). Estratigrafía, Quimioestratigrafía y Petrografía de la Formación Rosablanca: Implicaciones para la identificación de Eventos Anóxicos Oceánicos en la Cordillera Oriental Colombiana. Tesis de Pregrado en Geología. Universidad de Manizales.
- Biernacki W, Davíðsdóttir B, Duarte A, et al. (2016) Geo-education methodology. A case study from Croatia, Iceland, Poland and Portugal. International project. Erasmus.
- Campos, M.; Acevedo, A.; Lasso, C.; Fernández-Auderset, J. (2018). Variaciones morfológicas y algunas notas bioecológicas del cangrejo de agua dulce *Neostrengeria charalensis* Campos y Rodríguez, 1985 (Decapoda: Pseudothelphusidae), en ambientes exo y endocársticos de los Andes colombianos. Biota Colombiana 19 (Sup. 1) – 2018.
- Carcavilla, L.; Delvene, G.; Díaz-Martínez, E.; García, A.; Lozano, G.; Rábano, I.; Sánchez, A.; Vegas, J. Geodiversidad y patrimonio geológico. Instituto Geológico y Minero de España. 21 p. Madrid. NIPO: 474-11-012-3. EDICIÓN PARQUES NACIONALES.

- Carcavilla, L.; Belmonte, A.; Durán, J.; López-Martínez, J.; Robledo, P. (2016). Patrimonio geológico y geodiversidad en terrenos kársticos en España. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2016 (24.1) - Pags. 61-73.
- Cardozo, N.; Allmendinger, R. (2013). Spherical projections with OSXStereonet: *Computers & Geosciences*, v. 51, no. 0, p. 193 - 205, doi: 10.1016/j.cageo.2012.07.021.
- Cigna, A.; Forti, P. (2013). Caves: the most important geotouristic feature in the world. *Sociedade Brasileira de Espeleología (SBE). Tourism and Karst Areas*, 6(1) 9-26.
- Colegial, J. D., G. Piscioti, E. Uribe (2002), “Metodología para la definición, evaluación y valoración del patrimonio geológico y su aplicación en la geomorfología glaciar de Santander (municipio de vetas)”, *Revista Boletín de Geología*, vol. 24, núm. 39, pp. 121-135.
- Coletta, B., Herbard, F., Letouzey, J., Werner, and Rudkiweicz, J., (1990). Tectonic Style and crustal structure of the Eastern Cordillera (Colombia) from balanced cross section. *Ecopetrol internal report*, Bogotá.
- Cruz, L., Caballero, V. (2002). *Petrología Sedimentaria: Guías de laboratorio*. Universidad Industrial de Santander, 81p.
- Fairchild, I.J.; Baker, A. (2012). *Speleothem science: from process to past environments*. John Wiley & Sons. Oxford
- Figueredo L. (2014). Speleotourism, environmental education and training processes in caving: report of experiences in Brazil and Mexico. *Conference VII Congress of Speleology of Latin America and the Caribbean*. 2014; 2–15.
- Ford, D.; Williams, P. (2007). *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. Inglaterra, Willey.
- Frisia, S. (2015). Microstratigraphic logging of calcite fabrics in speleothems as tool for paleoclimate studies. *International Journal of Speleology* 44 (1): 1-16.

- Galvis-Gómez, M. A. (2018). Mapa del Potencial Kárstico del Departamento de Santander (Colombia). Trabajo final de Especialización, Universidad Militar Nueva Granada.
- Gelvez-Chaparro JE, Herrera-Ruiz JI, Zafra-Otero D, et al. (2018). Geotouristic potential in karst systems of santander (Colombia): the begining of right geoducational and geoconservational practices. *Int J Hydro*. 2018;2(6):713–716. DOI: 10.15406/ijh.2018.02.00148
- Geosurvey, (2000). Cartografía geológica y estratigrafía del Cretáceo y del Terciario en el área de Landazuri, La Paz y Santa Helena del Opón, Departamento de Santander. Informe interno de Ecopetrol.
- Gilli, E. (2015). *Karstology. Karsts, caves and Springs. Elements of Fundamental and Applied Karstology*. USA: Taylor & Francis Group.
- Gunn, J. (Ed.) (2004). *Encyclopedia of Cave and Karst Science*. New York, USA: Fitzroy Dearborn.
- Hapka, R.; Jutzet, J.M.; Bochud, M.; Fernandez, J. (2015). *Speleo-Colombia 2011-2013. Cavernes. Special Colombie*.
- Henriques, M.; Pena dos Reis, R.; Brilha, J.; Mota, T. (2011). Geoconservation as an Emerging Geoscience. *Geoheritage* (2011) 3:117-128.
- Hubach, E., 1953, Condiciones geológicas de las variantes de carretera en la región de Arcabuco-Barbosa-Oiba. *Serv. Geol. Nal., Informe 952*. Ingeominas, Bogotá.
- Hubach, E., 1957, Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia, *Serv. Geol. Nal.. Informe 1212*. Ingeominas, Bogotá.
- Huff, L. (1940). Artificial helictites and gypsum flowers. *The Journal of Geology*, 48: 641-659.
- Ingeominas ,2008. Cartografía Geológica y muestreo geoquímico escala 1:100.000 de la planca 150-Cimitarra. Bogota.

- Julivert, M., 1968. Lexique Stratigraphique International. Vol. V Amerique Latine, Fasc. 4. Colombie, Paris.
- Kranjc, A. (2011). The Origin and evolution of the term “Karst”. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 19 (2011) 567-570.
- Littva, J.; Hók, J.; Bella, P. (2015). Cavitonics: Using caves in active tectonic studies (Western Carpathians, case study). *Journal of Structural Geology* 80 (2015) 47-56.
- Llopis, N. (1970). *Fundamentos de hidrogeología Carstica (Introducción a la Geoespeleología)*. Madrid, España: Editorial Blume.
- Mantilla-Figueroa, L. C.; Cruz G. L. E; Colegial G. J. D., 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* Vol. 25, No. 40.
- Mata-Perelló, J.; Mata, R. (). *Geología Social: una nueva perspectiva de la Geología y del Patrimonio Geológico*
- Morales, L. G., 1958. General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia. *Symposium on the habitat of oil*. American Association of Petroleum Geologists. 76p Tulsa.
- Muñoz-García, M.B.; Cruz, J.; Martín-Chivelet, J.; Ortega, A.I.; Turrero, M.J.; López-Elorza, M. (2016). Comparison of speleothem fabrics and microstratigraphic stacking patterns in calcite stalagmites as indicators of paleoenvironmental change. *Quaternary International* 407 (2016): 74-85.
- Myroie, J.E.; Sasowsky, I.D. (Eds.). (2004). *Studies of Cave Sediments, Physical and Chemical Records of Paleoclimate*. Editorial Springer.

- Newsome, D.; Dowling, R. (2018). *Geoheritage and Geotourism. Chapter 17 Geoheritage: Assessment, Protection, and Management Book* pp: 305-321. Elsevier Inc.
- Nica, A.; Meila, A.; Macovei, L. (2007). *Speleootherapy. Romanian Journal of Rheumatology.* 2007; XVI:4–200.
- Nolasco, T. (2004). *Estudio de la foliación tectónica en el sector Vèlez-Bolívar-Guavatà (Departamento de Santander). Tesis de pregrado Universidad Industrial de Santander.*
- Palacio Prieto, J.L., Sanchez Cortez, J.L., Schilling, M.E. (Eds.), 2016. *Patrimonio geológico y su conservación en América Latina. Situación y perspectivas nacionales, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (in Spanish).*
- Quinif, Y.; Vandycke, S. (2001) “Karst and tectonics”—preface. *Geologica Belgica* 4 (3–4), *Karst & Tectonics* 171–173.
- Ramirez, V. (2014). *Reconstituicao Paleoclimática dos últimos 5500 anos nos Andes Orientais Da Colombia. (en amarillo falta letras portuguesas). Dissertacao de Mestrado. Universidade de Sao Paulo.*
- Renzoni, G.; Ospina, C. (1969). *Geología del Cuadrángulo J-12; Informe no. 1546; Servicio Geológico Nacional, Bogotá.*
- Rodrigues, J. (2009). *A Importancia dos Geoparques no Ensino e Divulgacao das Geociencias. Revista do Instituto de Geociencias-USP. Geol. Geol. USP, Publ. espec., São Paulo, v. 5, p. 27-33, outubro 2009.*
- Santos, H.; Vieira, C.; Sallun, W.; Vaz, L.; Rasteiro, M. (2007). *Geotouristic Potential of the Karstic Landscape. Global Tourism* 2007; 3 (2): 1-20.
- Shanov, S.; Kostov, K. (2015). *Dynamic Tectonics and Karst. Springer*

- Soriano, M. (1985). Tipos de lapiaz generados en las cercanías de Zaragoza. *Acta Geológica Hispánica* 20(2): 131-139.
- Uasapud, N.; Weber, M.; Caballero, H. (2018). Aplicación de índices ambientales en el karst del oriente Antioqueño. *Memorias I Congreso Colombiano de Espeleología y VIII Congreso Espeleológico de América Latina y el Caribe*.
- Veress, M. (2010). *Karst Environments. Karren Formation in High Mountains*.
- Veress, M. (2016). *Covered Karst. Szombathely, Hungary: Springer Geology*.
- Ward, D.; Goldsmith, R.; Cruz, B.; Jaramillo, C.; Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 (Bucaramanga) y H13 (Pamplona), Departamento de Santander. *Boletín Geológico*, Vol XXI, pp. 1-132.
- Williams P. (2008). The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. *International Journal of Speleology*, 37 (1), 1-10. Bologna (Italy). ISSN 0392-6672.
- White William B. (2017). *Mineralogy of Mammoth Cave. Cave and Karst Systems of the World*.
- Wyss, M.; Peppoloni, S. (2014). *Geoethics: Ethical Challenges and case Studies in Earth Sciences*.
- Zamarreño, I. (1963). Estudio Petrográfico de las Calizas de la Formación Rosablanca de la Región de la Mesa de los Santos. *Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander*. pp. 5-34.