

# Caracterización petrográfica, mineralógica y geoquímica de elementos traza en esfaleritas del municipio de Chiquinquirá, Colombia

Valentina Peralta-Lozada<sup>1\*</sup> ; Andrés Ignacio Rodríguez-Vargas<sup>1</sup> ; Bogdan Nitescu<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Departamento de Geociencias, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.

(\*) v.peraltal@uniandes.edu.co, ai.rodriguez@uniandes.edu.co, b.nitescu@uniandes.edu.co

## Resumen

El aumento en la demanda sobre metales considerados críticos por numerosos países, tales como el galio (Ga), germanio (Ge) e indio (In), para el desarrollo de nuevas tecnologías, ha generado el resurgimiento del interés sobre los yacimientos de zinc (Zn) y plomo (Pb) que corresponden a la mayor fuente de estos metales encontrados en depósitos Mississippi Valley Type (MVT), cuyo principal mineral alojante es la esfalerita. Las unidades cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia se presentan como el escenario propicio para la formación de estos depósitos, ya que cuentan con las características geológicas que favorecen su formación y coinciden cronológicamente con los eventos principales que dieron lugar a la mayoría de los depósitos MVT conocidos alrededor del mundo. La ocurrencia mineral de esfalerita ubicada sobre la vereda Caldas, en el municipio de Chiquinquirá, Boyacá, se sometió a una caracterización petrográfica y mineralógica con el fin de determinar la relación de dichos elementos críticos con este tipo de mineralizaciones. Se encontraron concentraciones destacables de Ga, Ge e In, alojadas en medio de estos sulfuros, los cuales se emplazan en medio de estas unidades cretácicas compuestas principalmente por rocas sedimentarias clásticas y localmente calcáreas. El origen de estos fluidos mineralizantes se da principalmente por la migración de aguas connatas ricas en metales lixiviados de rocas meteorizadas que son posteriormente sometidas a ambientes reductores que generan la precipitación de sulfuros como esfalerita y calcopirita. Los resultados obtenidos permiten atestiguar la potencialidad de este escenario geológico para albergar este tipo de elementos económicos de interés, lo cual se podría convertir en un indicador geológico que expanda la exploración de estos metales a una escala más regional.

**Palabras clave:** Metales críticos; Galio; Germanio; Indio; Depósitos MVT; Esfalerita.

## Petrographic, Mineralogical, and Geochemical Characterization of Trace Elements in Sphalerites from the Municipality of Chiquinquirá, Colombia

### Abstract

The increased demand for metals considered critical by numerous countries, such as gallium (Ga), germanium (Ge), and indium (In) for the development of new technologies, has generated a resurgence of interest in zinc (Zn) and lead (Pb) deposits. Such deposits are the largest source of these metals

---

Forma de citar: Peralta-Lozada, V.; Rodríguez-Vargas, A.I.; Nitescu, B. (2026). Caracterización petrográfica, mineralógica y geoquímica de elementos traza en esfaleritas del municipio de Chiquinquirá, Colombia. *Boletín de Geología*, 48(1), 33-52. <https://doi.org/10.18273/revbol.v48n1-2026002>

and are typically found in MVT environments, where the main host mineral is sphalerite. The Cretaceous units of the Eastern Cordillera of Colombia present an ideal setting for the formation of these deposits, as they have the geological characteristics that favor their formation and coincide chronologically with the main events that led to the formation of most known Mississippi Valley Type (MVT) deposits around the world. The occurrence of sphalerite located in Vereda Caldas in the municipality of Chiquinquirá, Boyacá was characterized petrographically and mineralogically to determine the relationship of these critical elements with this type of mineralization. Significant concentrations of Ga, Ge, and In were found hosted within these sulfides, which are emplaced within Cretaceous units mainly composed of clastic and locally calcareous sedimentary rocks. The origin of the mineralizing fluids is primarily related to the migration of connate waters rich in metals leached from weathered rocks, which are subsequently subjected to reducing environments that generate the precipitation of sulfides such as sphalerite and chalcopyrite. The results obtained confirm the potential of this geological environment for hosting elements of economic interest, which could become a geological indicator that favors the expansion of exploration of these metals on a regional scale.

**Keywords:** Critical metals; Gallium; Germanium; Indium; MVT deposits; Sphalerite.

## Introducción

El desarrollo de nuevas tecnologías es el centro de la sociedad moderna, y el avance de los productos tecnológicos implica una evolución en la complejidad de los materiales necesarios para su elaboración (Graedel *et al.*, 2015). Entre estos materiales se encuentran los utilizados en fibras ópticas, pantallas LCD, semiconductores y paneles solares (Zheng *et al.*, 2023). El galio se utiliza en semiconductores mediante aleación con arsénico; el germanio, en el revestimiento interno de fibras ópticas; y el indio, en aleación con estaño y oxígeno, en la fabricación de pantallas táctiles. Estos metales se encuentran en bajas concentraciones en la corteza terrestre, con promedios de 17,5 ppm para el galio y 1,5 ppm para el germanio (Rudnick y Gao, 2014), por lo que no forman depósitos económicamente viables por sí solos, sino que se obtienen como subproductos en depósitos de metales principales (Licht *et al.*, 2015; Nassar *et al.*, 2015). Los yacimientos de zinc (Zn) y plomo (Pb) alojados en carbonatos constituyen la mayor fuente de metales como Ga, Ge e In, que se presentan en concentraciones de hasta 500 ppm (Huston y Bastrakov, 2024) en la esfalerita que es el mineral de mena en estos depósitos (Cook *et al.*, 2009) y de donde son recolectados como subproductos (Licht *et al.*, 2015; Nassar *et al.*, 2015). Sin embargo, estudios detallados sobre las concentraciones de estos elementos en yacimientos de Zn-Pb son limitados en Colombia.

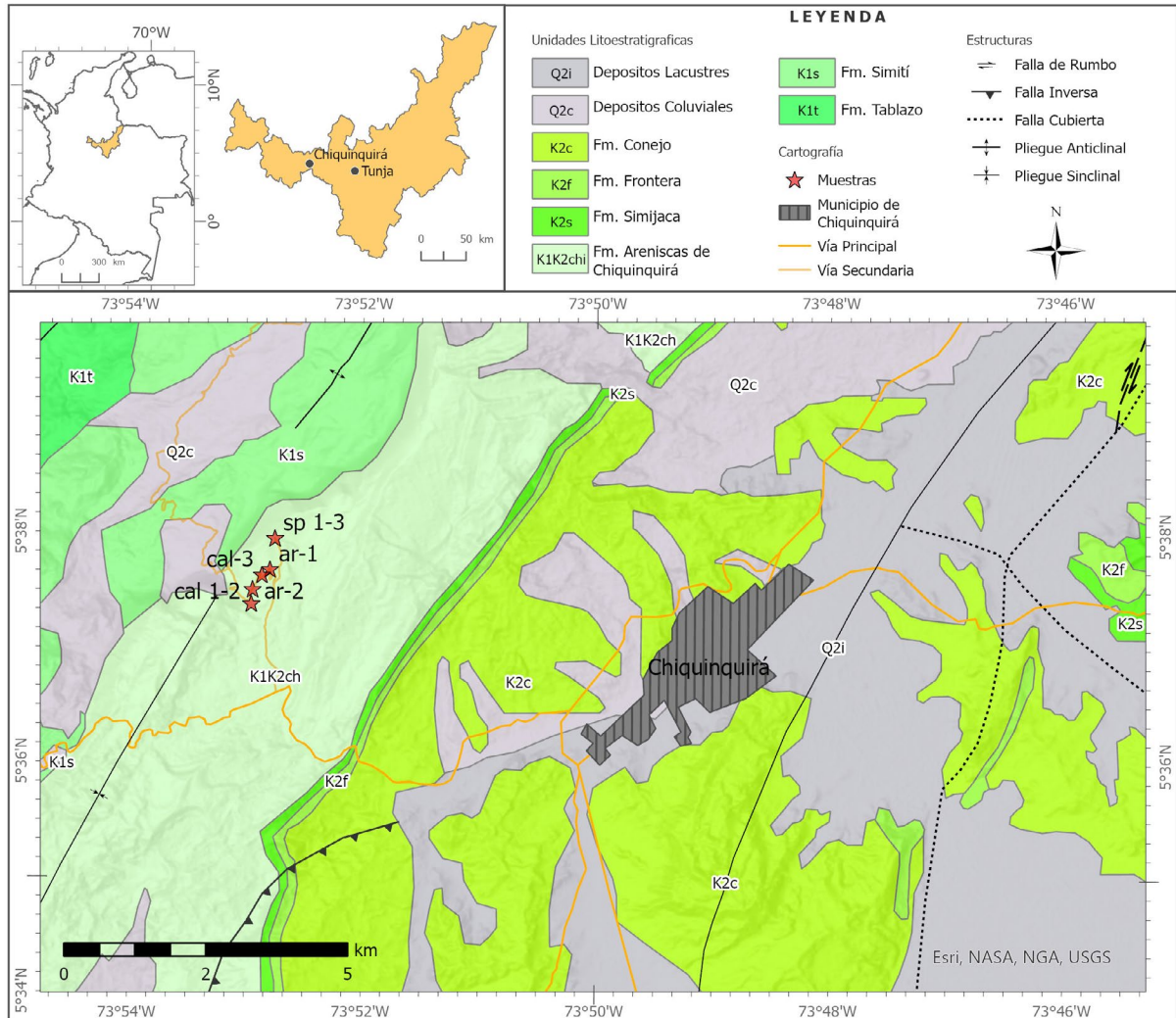
En Colombia, existen las condiciones propicias para la formación de depósitos estratiformes de Zn-Pb en la cuenca cretácica de la Cordillera Oriental, ya que esta presenta características geológicas en común con las regiones de depósitos de Pb y Zn en el mundo

(e. g. Tri-State, EE. UU.; Pin-Point, Canadá; Irish Midlands, Irlanda) (Sarmiento-Rojas, 2002; Leach *et al.*, 2010). En el área de Chiquinquirá, Boyacá, se han observado secuencias carbonatadas de origen Cretácico con ocurrencia de mineralizaciones de esfaleritas bajas en hierro que albergan metales de interés como Ga, Ge e In. En este estudio se realizó la caracterización mineralógica y petrográfica de las ocurrencias de esfalerita para así proponer un modelo de formación de las mineralizaciones y determinar la relación existente con sus contenidos de Ge, Ga e In.

La esfalerita es el mineral principal en el que se encuentran el indio, galio y germanio en sistemas hidrotermales de sulfuros (Cook *et al.*, 2009; Bauer *et al.*, 2019). Estudios previos han demostrado que la esfalerita puede incorporar en su estructura una amplia variedad de elementos traza (Ye *et al.*, 2011; Frenzel *et al.*, 2016) cuyas concentraciones pueden ser indicativas para determinar el tipo de depósito Pb-Zn (Stoiber, 1940; Cook *et al.*, 2009). Las concentraciones de Ga, Ge e In en esfaleritas están controladas por el origen, la temperatura, las condiciones de oxidación, reducción y la salinidad de los fluidos hidrotermales de los cuales precipitan (Cook *et al.*, 2009; Frenzel *et al.*, 2016). El Ga y el Ge tienden a estar enriquecidos en esfaleritas de depósitos de baja temperatura (<150 °C), mientras que el enriquecimiento en In está relacionado con sistemas de mayor temperatura (Cook y Ciobanu, 2015; Huston y Bastrakov, 2024). Adicionalmente, distintos autores han propuesto que existe una correlación entre la composición química de la esfalerita y el tipo de depósito (Cook *et al.*, 2009; Ye *et al.*, 2011). En depósitos tipo skarn se observan

concentraciones elevadas de Co, Mn e In; en sulfuros masivos volcanogénicos (VMS), contenido elevado de In, Sn y Ga; y los depósitos tipo MVT presentan altas concentraciones de Ge, Cd, Tl y As.

Las muestras de esfaleritas bajas en Fe analizadas en la presente investigación están localizadas en rocas calcáreas sedimentarias cretáceas del flanco occidental de la Cordillera Oriental, cerca al municipio de Chiquinquirá, Boyacá (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa geológico de la zona de estudio. Se encuentran indicadas las localizaciones de las muestras tomadas para la investigación, las vías de acceso y la población de Chiquinquirá. La base geológica se editó en base a la Plancha 190 – Chiquinquirá, elaborada por [Fuquen y Osorno \(2005\)](#). Se observan las principales formaciones de interés que abarcan la zona de estudio, tales como la Formación Areniscas de Chiquinquirá, Formación Simití, Formación Tablazo y Formación Rosablanca.

Las rocas sedimentarias en esta región presentan características geológicas que sugieren la posible existencia de depósitos estratiformes de Pb-Zn, similares a los depósitos exhalativos de sulfuros masivos (SEDEX) ([Sarmiento-Rojas, 2002](#)), por su similitud con secuencias sedimentarias que alojan este tipo de depósitos. Sin embargo, estudios más recientes

muestran que algunas de estas mineralizaciones en el área de Chiquinquirá son discordantes respecto a la estratificación de las rocas sedimentarias que las hospedan, por lo que son consideradas epigenéticas ([Sepúlveda et al., 2020](#)); esta es una de las características de los depósitos “Mississippi Valley Type” (MVT).

Los depósitos MVT de Pb-Zn se forman a muy bajas temperaturas (~100 a 250 °C) en zonas poco profundas, usualmente sobre secuencias de plataforma carbonatada ubicadas en los flancos de cuencas sedimentarias a lo largo de márgenes pasivos (Arndt y Ganino, 2012), donde se encuentran típicamente emplazados en dolomías, calizas y, con menor frecuencia, en areniscas. Los minerales que predominan son esfalerita, galena, pirita, marcasita, dolomita, calcita y cuarzo (Arndt y Ganino, 2012), los cuales precipitan a partir de fluidos salinos de cuenca que remueven metales y azufre de fuentes continentales (Leach *et al.*, 2010). Las mineralizaciones ocurren principalmente por reemplazamiento de rocas calcáreas y, en menor proporción, relleno de espacios vacíos. Estas mineralizaciones se ven favorecidas por el control tectónico que caracteriza los depósitos al presentarse fallas, fracturas y brechas de colapso (Leach *et al.*, 2010). La génesis de estos depósitos está fuertemente relacionada con procesos tectónicos globales, ya que las dataciones realizadas coinciden en que la mayoría de los depósitos MVT se formaron durante eventos tectónicos compresivos; el del Devónico-Pérmico fue el de mayor relevancia, y el periodo del Cretácico-Terciario el segundo más importante (Leach *et al.*, 2001).

A pesar de la potencialidad de las rocas sedimentarias de la Cordillera Oriental de alojar yacimientos de Pb-Zn que puedan contener cantidades económicas de Ga, Ge e In, los estudios que se han realizado orientados a la caracterización de estas mineralizaciones son muy limitados.

La sociedad moderna carece de un adecuado conocimiento y divulgación sobre los elementos que se extraen de minerales y son usados en productos que hacen parte de la vida cotidiana y del desarrollo tecnológico; particularmente, en el caso de Colombia, este desconocimiento es aún mayor al considerar que gran parte de los dispositivos modernos no se fabrican nacionalmente. El presente trabajo tiene como finalidad aportar en la caracterización de los minerales que poseen dichos elementos, enfatizando en que de su entendimiento y exploración dependen la continuidad y/o mejoramiento de equipos y procedimientos tecnológicos modernos.

### **Marco geológico**

La ocurrencia mineral representa una mina abandonada que se encuentra ubicada en la parte central de Colombia,

130 km al noreste de Bogotá, en la vereda Caldas, a 10 km del municipio de Chiquinquirá (Figura 1).

La zona de estudio se encuentra sobre la cuenca cretácica de la Cordillera Oriental, la cual hace parte de los Andes colombianos. Este cinturón orogénico se ve influenciado principalmente por la subducción hacia el este de la placa oceánica de Nazca, bajo la placa Sudamericana, y en menor medida por la subducción de la placa del Caribe. La Cordillera Oriental está compuesta por estructuras plegadas y una serie de fallas de rumbo transpresionales (Horton *et al.*, 2020). Los principales sistemas de fallas que limitan la cuenca son las fallas Buitama y La Salina al noroeste y al sureste el sistema de fallas Algeciras-Garzón.

Los procesos de acortamiento de la corteza asociados al levantamiento de la Cordillera Oriental, que se dieron desde el Cretácico Tardío hasta el Neógeno, generaron que las unidades de la cuenca cretácica quedaran expuestas al elevarse aproximadamente 8 km respecto a sus cuencas aledañas del Valle del Magdalena Medio y de los Llanos Orientales (Horton *et al.*, 2020). Estas unidades corresponden a una secuencia gruesa de rocas sedimentarias clásticas y, en menor proporción, a carbonatos depositados en ambientes continentales, litorales o neríticos (Sarmiento-Rojas, 2002).

La Cordillera Oriental es la rama más oriental de los Andes del norte de Colombia, con orientación NNE, de 110 a 200 km de ancho, separada de los complejos magmáticos de la Cordillera Central por la cuenca del Valle Medio del Magdalena. El levantamiento de la Cordillera Oriental es el resultado del acortamiento del retroarco cenozoico y la deformación transpresional en los Andes más septentrionales del noroeste de Sudamérica (Horton *et al.*, 2020). Este cinturón orogénico es un sistema de cabalgamiento de doble vergencia formado durante el Cenozoico por la inversión de un rift de retroarco mesozoico (Colletta *et al.*, 1990; Cooper *et al.*, 1995; Mora *et al.*, 2006). El basamento de la Cordillera Oriental está compuesto por rocas metamórficas de edad Grenvilliana (Forero-Suarez, 1990), que fueron intruidas por rocas plutónicas del Paleozoico y Mesozoico (Ward *et al.*, 1973; Horton *et al.*, 2010a, 2010b).

La geología que abarca la zona de Chiquinquirá cuenta con estructuras que denotan una influencia tectónica compresiva, ya que se evidencian fallas

de cabalgamiento de gran extensión y una amplia variedad de pliegues (Figura 1). La zona de estudio particularmente se encuentra cercana al Anticlinal de Jesús María, el Sinclinal de Chiquinquirá-San José de Pare, al Sinclinal de Aposentos y, a su vez, a múltiples fallas de cabalgamiento (Fuquen y Osorno, 2005). Las formaciones Areniscas de Chiquinquirá y Simijaca abarcan gran parte de la zona de estudio. La primera corresponde principalmente a facies arenosas acumuladas en ambientes marinos someros y a segmentos lutíticos que representan fondos marinos tranquilos (Terraza-Melo, 2012). Por otro lado, la Formación Simití está compuesta por intercalaciones de lodolitas arenosas, areniscas cuarzosas micáceas con unidades calcáreas. En las unidades litológicas se observa estratificación ondulada paralela, drusa de cuarzo y múltiples especies fósiles (Fuquen y Osorno, 2005). Este tipo de formaciones sedimentarias son fuentes potenciales de elementos como galio, germanio e indio, principalmente porque estos elementos poseen características geoquímicas similares a las que tiene el zinc en la esfalerita y se concentran especialmente en procesos hidrotermales de baja temperatura (Marsh *et al.*, 2016).

### Metodología

En la etapa inicial de la investigación se realizó una revisión de la literatura con el objetivo de reunir el fundamento teórico de este estudio. Esta revisión se basó principalmente en la descripción de los depósitos MVT que realizan Leach *et al.* (2010) y las caracterizaciones de elementos traza en esfaleritas de diferentes depósitos que realizan Cook *et al.* (2009) y Frenzel *et al.* (2016).

En este estudio se analizaron 9 muestras que fueron recolectadas en la vereda Caldas, Chiquinquirá (Figura 1), de las cuales se fabricaron 9 secciones delgadas pulidas. El análisis petrográfico se realizó usando microscopía convencional de luz transmitida y reflejada incluyendo tanto la descripción macroscópica como microscópica de las muestras y, a su vez, la estimación del contenido mineralógico de cada sección; se realizaron conteos de 300 a 350 puntos.

En el trabajo de química mineral se utilizó un equipo del tipo microscopio electrónico de barrido (SEM) y se acopló una microsonda EDX de marca TeScann. Las secciones delgadas pulidas fueron recubiertas inicialmente con oro, y en un segundo análisis se cambió a recubrimiento de carbono para evitar posibles traslapes de niveles energéticos a la hora de ser analizado con una microsonda de tipo EDX. Dentro de este análisis se realizaron determinaciones de química mineral puntuales, mapas geoquímicos, además de toma de microimágenes con la metodología de electrones retrodispersados. El análisis de microsonda electrónica se realizó con un equipo que utiliza un filamento de tungsteno con el cual se obtienen imágenes de alta calidad, con un rango de energía de haz de electrones que va desde 0,2 a 30 kilo electronvoltios, lo que permite observaciones hasta de 100.000 x.

Generalmente, la distancia de trabajo fue de menos de 1 cm con lo cual se pudieron obtener imágenes que abarcaban un área amplia, así como algunos detalles puntuales en los cuales se concentraron la mayoría de los análisis de tipo EDX. El primer análisis en esfaleritas fue realizado con la ayuda de un microscopio electrónico acoplado con una sonda EDS para análisis químico puntual y de áreas. Cabe anotar que en esta ocasión el recubrimiento se hizo con una capa de oro, con lo que se esperaba evitar los efectos estáticos que se producen durante el análisis. Gran parte de estos análisis de microsonda electrónica duraron menos de 2 minutos por muestra, con lo que se pudieron obtener detalles composicionales de los minerales integrantes. Con frecuencia, se efectuaron análisis puntuales para identificar algunas fases minerales y/o variación de composiciones desde el núcleo hasta el borde para algunos minerales de interés.

### Resultados

#### Mineralogía y petrografía

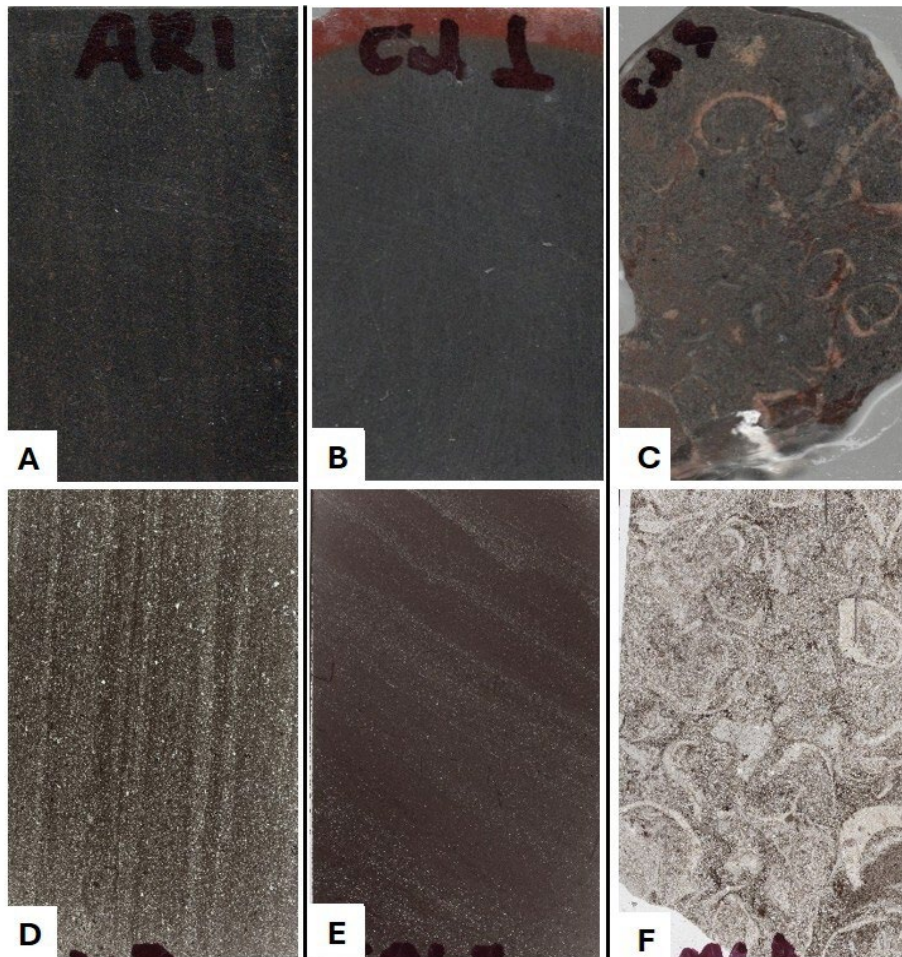
Las muestras recolectadas para este estudio se agruparon con base en su mineralogía, la cual se resume en la Tabla 1. Se identifican dos grupos: material de vena con ensambles minerales de carbonatos y sulfuros y material de roca caja que incluye calizas, areniscas y lodolitas.

**Tabla 1.** Resumen de la mineralogía presente en las 9 muestras tomadas en la ocurrencia mineral ubicada en la vereda Caldas y sus alrededores. Litológicos: constituyentes primarios que definen la roca. Alteración: producto de una transformación de un mineral preexistente. Introducción: mineral que se emplaza rellenando fracturas formando venas o venillas. Mineralización: minerales considerados parte de la mena. Abreviaturas: min.: mineralización.

| Muestra        | sp-1             | sp-2                                    | sp-3                                    | cal-1                                   | cal-2                     | cal-3                     | lod-1                                                                  | lod-2                       | lod-3                                    |                                          |
|----------------|------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| Categoría      | Mineral          | Material de vena con min. de esfalerita | Material de vena con min. de esfalerita | Material de vena con min. de esfalerita | Caliza con min. de pirita | Caliza con min. de pirita | Caliza fosilífera con alteración sericita-clorita y min. de esfalerita | Lodolita con min. de pirita | Lodolita arenosa con cemento ferruginoso | Lodolita arenosa con cemento ferruginoso |
| Litológicos    | Arcillas         |                                         |                                         |                                         |                           |                           |                                                                        | 32,5                        | 45                                       | 37,4                                     |
|                | Materia orgánica |                                         |                                         |                                         |                           |                           |                                                                        | 15                          | 10                                       | 8,6                                      |
|                | Calcita          |                                         |                                         |                                         | 4,2                       | 2,8                       | 46,7                                                                   | 5                           |                                          |                                          |
|                | Cuarzo           |                                         |                                         |                                         | 8,5                       | 9,7                       | 32,5                                                                   | 17                          | 15                                       | 22,5                                     |
|                | Micas            |                                         |                                         |                                         | 1,3                       | 3,9                       |                                                                        | 18                          | 10                                       | 10,7                                     |
|                | Micrita          |                                         |                                         |                                         | 85,2                      | 82,3                      | 3,6                                                                    |                             |                                          |                                          |
| Alteración     | Ankerita         | 25                                      | 4,5                                     | 14                                      |                           |                           |                                                                        |                             |                                          |                                          |
|                | Siderita         |                                         | 9                                       | 37                                      |                           |                           |                                                                        |                             |                                          |                                          |
|                | Calcita          | 3                                       | 6                                       | 5,1                                     |                           |                           |                                                                        |                             |                                          |                                          |
|                | Dolomita         | 7                                       | 5,5                                     | 10                                      |                           |                           |                                                                        |                             |                                          |                                          |
|                | Sericita         |                                         |                                         |                                         |                           |                           | 7,1                                                                    |                             |                                          |                                          |
|                | Clorita          |                                         |                                         |                                         |                           |                           | 4,3                                                                    |                             |                                          |                                          |
| Introducción   | Calcita          |                                         | 1,5                                     |                                         |                           |                           |                                                                        |                             |                                          |                                          |
|                | Cuarzo           |                                         |                                         | 7,2                                     |                           |                           |                                                                        | 9,5                         |                                          |                                          |
|                | Goethita         |                                         |                                         |                                         |                           |                           |                                                                        |                             | 2                                        | 4,8                                      |
|                | Fe Ox            | 4                                       |                                         |                                         |                           |                           |                                                                        |                             | 15                                       | 15,9                                     |
| Mineralización | Esfalerita       | 59,5                                    | 64,6                                    | 18                                      |                           |                           |                                                                        |                             |                                          |                                          |
|                | Calcopirita      | 1,5                                     | 8,9                                     | 3,2                                     |                           | 1,3                       |                                                                        |                             |                                          |                                          |
|                | Pirita           |                                         |                                         |                                         | 0,8                       |                           | 1,9                                                                    | 3                           |                                          |                                          |

**Roca caja:** El término de roca caja se utiliza para referirse a las rocas próximas a un depósito u ocurrencia mineral. En este caso, el conjunto de muestras tomadas

lo integran tres lodolitas y tres calizas de las cuales dos se clasificaron según Dunham (1962) como mudstones y una como packstone (Figura 2).



**Figura 2.** Fotografías de las muestras pertenecientes al grupo de roca caja tomadas de localidades próximas a la ocurrencia mineral de la vereda Caldas. Fotografías de muestras de mano (A-C) y fotografías de la sección delgada escaneada en nicoles paralelos (D-F). A-D. lod-1: lodolita. B-E. cal-1: micritas o mudstones. C-F. cal-3: packstone o bioesparita mal seccionada.

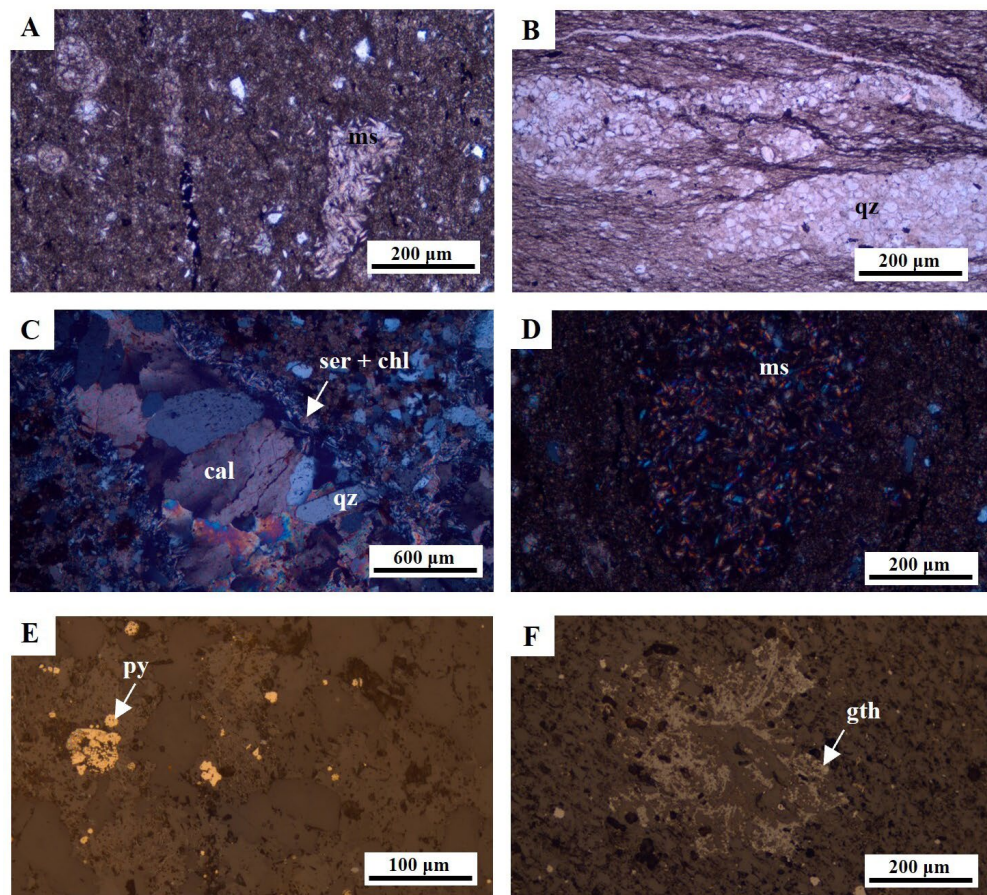
Las muestras de lodolitas en muestra de mano y sección delgada macroscópica evidencian laminación plano-paralela y granos que se observan a simple vista. Posterior al análisis microscópico es posible distinguir estos granos como cristales de cuarzo y hojuelas micáceas de tipo moscovita que alcanzan el tamaño de arena muy fina; la matriz en la que se encuentran es de tamaño limo y arcilla en la que también se hallan estos minerales. La matriz es predominante en estas muestras por lo que se clasificó como una lodolita arenosa. Presentan una laminación que intercala arenas de tamaño muy fino y limos con mayor contenido de materia orgánica y arcillas. Los minerales opacos identificados son predominantemente goethita y, de forma accesorio, rutilo y magnetita. Principalmente, la goethita se distingue por

sus reflejos internos color anaranjado oscuro o rojizo, y se presenta relleno intersticios alrededor de cristales de rutilo o cuarzo (Figura 3F). Finalmente, se observa un contenido importante de óxidos de hierro amorfo.

La muestra lod-1 en escala de muestra de mano presenta un tamaño de grano muy fino. El análisis microscópico permitió determinar que se trata de una lodolita con granos de cuarzo y mica tipo moscovita, de tamaño limo y arcilla, con presencia de materia orgánica y agregados de piritas framboidales. Adicionalmente, se observa un cambio de tamaño de grano en la laminación que es discontinua y forma lentes de cuarzo, los cuales alcanzan un tamaño de grano de arena muy fina (Figura 3B).

Se recolectaron 3 muestras de calizas, las cuales a escala macroscópica presentan un tamaño de grano muy fino, laminación y abundante materia orgánica por su color grisáceo. En estas muestras se encuentran algunos fósiles rellenos por agregados de mica tipo moscovita (Figura 3A-3D). Las muestras cal-1 y cal-2 se clasificaron, según Dunham (1962), como mudstones por su alto contenido en lodo calcáreo. Por otro lado, la muestra cal-3 se clasificó como una packstone, ya que predomina el cemento esparítico y contiene pocos aloquímicos, por lo que el armazón está compuesto

principalmente de terrígenos como cuarzo. Esta muestra tiene la particularidad de contener cristales de esfalerita en contacto con los cristales de esparita e incluso dentro de fósiles, en su mayoría bivalvos, reemplazados por cemento. Estos cristales a menudo se encuentran rodeados por hojuelas de sericita y clorita además de cristales de cuarzo con formas euhedrales prismáticas (Figura 3C). Finalmente, contiene óxidos de hierro amorfo y, al igual que las otras dos calizas, agregados de pirita framboidal (Figura 3E).



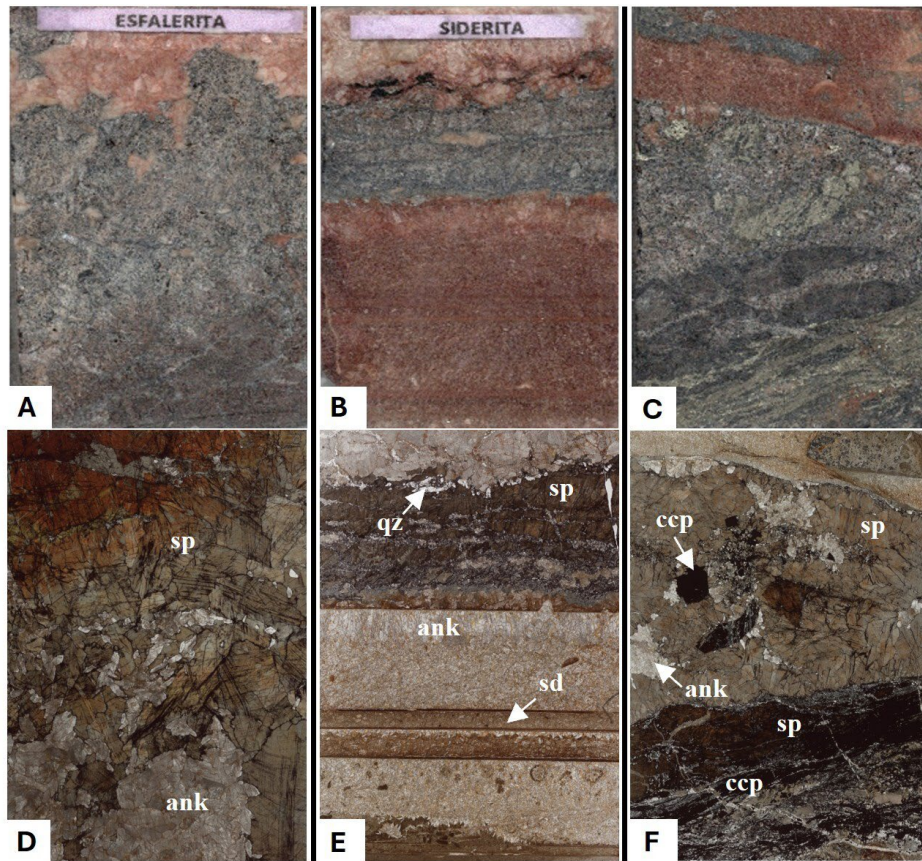
**Figura 3.** Microfotografías de secciones pulidas tomadas en nicols paralelos (A, B), nicols cruzados (C, D) y luz reflejada (E, F) que muestran detalles texturales de las muestras de roca caja que rodean la ocurrencia mineral que tiene lugar en la vereda Caldas. **A-D.** Agregados de mica tipo moscovita que se encuentran reemplazando fósiles. Muestra cal-2. **B.** Clastos de grano fino que evidencian bandeamiento en el cual se dan cambios de tamaño de grano formando lentes de cuarzo discontinuos. Muestra lod-1. **C.** Cristales de esparita que alcanzan los 600 µm que se encuentran relleno de un fósil de bivalvo junto a cristales euhedrales de cuarzo. Estos se encuentran rodeados por cristales de sericita + clorita acicular. Muestra cal-3. **E.** Agregados de pirita framboidal. Muestra cal-3. **F.** Goethita intersticial que rodea cristales de cuarzo. Esta se distingue por su color gris plateado en luz reflejada y los reflejos internos que exhibe de color anaranjado. Muestra lod-3. Abreviaturas: cal: calcita; chl: clorita; gth: goethita; ms: moscovita; py: pirita; qz: cuarzo; ser: sericita. Adaptado de Whitney y Evans (2010).

**Material de vena:** El material de vena es principalmente un conjunto mineral que se encuentra en una estructura de tipo vena o venilla, que en este caso corresponde en su mayoría a minerales del grupo de los carbonatos.

A escala macroscópica, el material de vena presenta: I) cristales de calcopirita rodeados por cristales de esfalerita color marrón a gris con notorios cambios de tonalidad (Figura 4A-4D); II) bandeamiento localizado

de cristales de esfalerita y minerales traslucidos tales como: siderita y ankerita (Figura 4B-4E); III) cristales color amarillo intenso con un brillo metálico que corresponden a cristales de calcopirita asociados

a zonas de microestructuras (Figura 4C-4F); y IV) cristales individuales de color blanco con brillo vitreo que corresponden a calcita, dolomita y cuarzo presentes en las 3 muestras.



**Figura 4.** Fotografías de material de vena con mineralización de esfalerita en la ocurrencia mineral de la vereda Caldas. Fotografías de muestra de mano (A, B, C) y fotografías de la sección delgada escaneada en nicols paralelos (D, E, F). A-D. sp-1; B-E. sp-2; C-F. sp-3. Abreviaturas: sp: esfalerita; ank: ankerita; qz: cuarzo; sd: siderita; ccp: calcopirita.

La asociación de minerales observada en estas mineralizaciones consiste en un conjunto de carbonatos y sulfuros dentro de los que resaltan, además de la esfalerita, la calcopirita, ankerita, siderita y dolomita. Texturalmente se observan: I) texturas brechoides de carbonatos y esfalerita; II) bandeo milimétrico de carbonatos y esfalerita (Figura 4B); III) cuarzo con textura tipo drusa con una orientación acorde al bandeamiento (Figura 4C); IV) emplazamiento de venillas que reflejan un intercrecimiento entre los diferentes tipos de esfalerita y carbonatos (Figura 4D); V) foliación sobre cristales de esfalerita rica en Fe y calcopirita (Figura 4F).

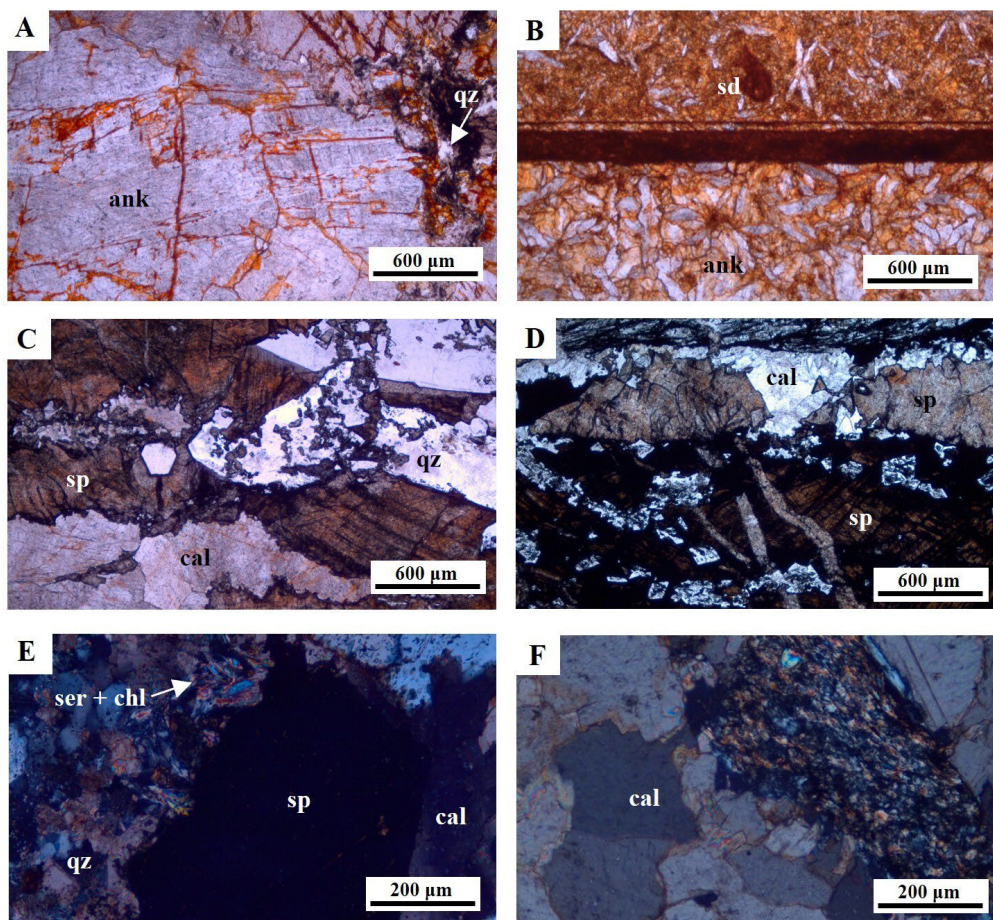
Este tipo de roca está integrada en su mayoría por carbonatos del tipo dolomita, entre ellos ankerita y dolomitas; también la integran algunos cristales de calcita y siderita. Particularmente, la ankerita destaca por su

clivaje romboédrico y por presentar frecuentemente una coloración marrón clara a naranja, la cual se acentúa en algunos patrones de clivaje (Figura 5A). Esta coloración se debe a la existencia de óxidos de hierro amorfo, los cuales tienen una coloración anaranjada y no tienen buenas características de pulido en luz reflejada. Al igual que la ankerita, la siderita es reconocible por su clivaje romboédrico y por la presencia de óxidos de hierro amorfo a lo largo de sus cavidades; se diferencia porque la abundancia de estos últimos se acentúa mucho más en la siderita, ya que cuenta con un mayor contenido de hierro en su estructura. Se presenta formando agregados granulares o incluso masivos de color amarillo a naranja (Figura 5B).

Por último, los cristales de calcita y dolomita se diferencian por que la dolomita suele presentar un leve pleocroísmo marrón-grisáceo, debido a la alteración, y la

calcita permanece incolora. Además, la birrefringencia de la calcita es ligeramente más alta que la de la dolomita lo que favorece su identificación. Estos minerales, a menudo, se observan con formas euhedrales romboédricas o formando venillas a partir de intercrecimientos con otros minerales como la esfalerita (Figura 5D-5F). En menor

proporción, se observan cristales euhedrales de cuarzo, de los cuales algunos alcanzan los 3 mm, que presentan una textura en drusa e inclusiones de origen hidrotermal. En la sección de la muestra sp-3, estos cristales se encuentran orientados siguiendo el bandeamiento milimétrico general de la muestra (Figura 5C).



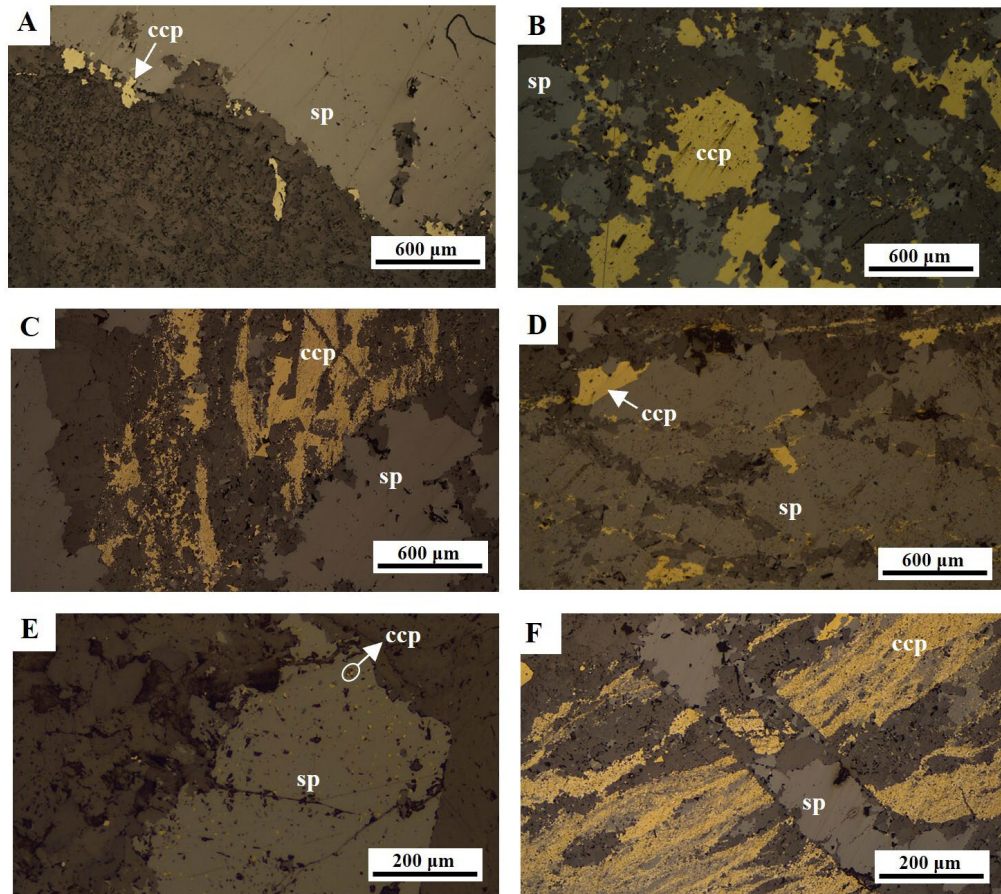
**Figura 5.** Microfotografías de secciones pulidas tomadas con luz transmitida en nicols paralelos (A, B, C, D) y nicols cruzados (E, F) que muestran detalles texturales de la ocurrencia mineral que tiene lugar en la vereda Caldas. **A.** Cristales de ankerita distinguidos por la distribución de óxidos de hierro amorfos en medio de los planos de clivaje y en contacto con un material de vena compuesto de cuarzo. **B.** Planos de bandeamiento milimétrico en los que se distinguen bandas micrométricas de óxido de hierro, siderita y cristales de ankerita con una distribución plano-paralela. **C.** Agregados de cristales subhedrales de cuarzo con una textura tipo drusa en contacto con cristales de esfalerita y de calcita. **D.** Cristales de esfalerita de dos generaciones: una de color marrón claro en la que es escaso el hierro y otra de color marrón oscuro en la que este metal predomina. Por lo general en medio de estas dos generaciones se encuentran cristales de calcita traslúcida. **E.** Cristal de esfalerita en medio de fósil de bivalvo, el cual a su vez está rodeado por hojuelas de sericita y clorita, estas últimas derivadas del proceso de alteración hidrotermal. Se reconocen además cristales de calcita originada por la recrystalización durante el mismo proceso de alteración. **F.** Fragmentos de roca caja, posiblemente fragmentos de lodolita, integrada principalmente por granos de cuarzo tamaño limo y una matriz rica en arcillas, además de materia orgánica. Estos fragmentos se encuentran por lo general rodeados de cristales de calcita originados durante el evento de alteración. Abreviaturas: ank: ankerita; cal: calcita; chl: clorita; qz: cuarzo; ser: sericita; sd: siderita; sp: esfalerita.

**Tipos de esfalerita:** Se identifican 2 variedades de esfalerita, la primera y más abundante se caracteriza por presentar tonalidades que oscilan entre un color marrón claro y uno más anaranjado-rojizo que se logra observar en nicols paralelos (Figura 5C). La segunda

variedad es casi opaca en nicols paralelos con cambios de tonalidades rojizos (Figura 5D). Por su opacidad se puede estimar que esta segunda variedad tiene un mayor contenido de hierro en su estructura.

La esfalerita ocasionalmente presenta inclusiones de calcopirita diseminada, rellenando microfracturas o intersticios. Ambas variedades de esfalerita tienen características semiopacas a opacas y comúnmente se encuentra formando agregados masivos o diseminado en otros minerales. En las muestras analizadas estos sulfuros a menudo muestran relaciones texturales entre ellos y con los carbonatos presentes. Se observa I) una textura brechoide con clastos de carbonatos y esfalerita en la que se presentan los granos de calcopirita en los intersticios o fracturas (Figura 6A-6C); II) intercrecimiento de calcita-dolomita con esfalerita a lo largo de venillas con cristales anhedrales de calcopirita

de hasta 200 micrones (Figura 6D); III) granos de calcopirita diseminada a lo largo de cristales de esfalerita rellenando microfracturas o siguiendo patrones de clivaje (Figura 6E). Este arreglo entre sulfuros revela la típica textura “chalcopyrite disease” que corresponde a una textura de reemplazamiento o exsolución que realiza la calcopirita sobre otros minerales como la esfalerita o bornita. Finalmente, IV) estos sulfuros se observan formando capas foliadas, especialmente en la muestra sp-2, ya que las bandas de calcopirita se muestran ligeramente plegadas. Dentro de estas bandas se forman lentes y estructuras cuneiformes de esfalerita debido al mismo bandeamiento (Figura 6F).



**Figura 6.** Microfotografías de secciones pulidas tomadas con luz reflejada que muestran detalles texturales de la ocurrencia mineral que tiene lugar en la vereda Caldas. **A.** Cristales de calcopirita localizados en el contacto entre cristales subhedrales de calcita y cristales anhedrales de esfalerita. **B.** Cristales anhedrales de calcopirita los cuales se reconocen por tener una reflectancia de color amarillo intenso muy contrastante con los cristales diseminados de esfalerita, los cuales tienen una reflectancia de color gris oscuro. Ambos tipos de sulfuros se presentan en medio de los cristales de ankerita y calcita. **C.** Cristales alargados de calcopirita que se presentan entre la esfalerita y calcita, reconocida por su exfoliación romboédrica. Sobre esta muestra los cristales de calcopirita tienen un tamaño variable que van de pocos micrones diseminados en medio de los cristales de calcita y llegan a alcanzar casi los 600 μm en tamaño. **D.** Cristales de calcopirita reconocidos rodeando algunos de esfalerita o rellenando algunas microfracturas dentro de este mismo tipo de sulfuro (Figura 5D nicoles paralelos). **E.** Presencia de una textura al interior del cristal de esfalerita que se denomina “chalcopyrite disease”, la cual es una textura especial de exsolución e indica el crecimiento simultáneo de ambos tipos de sulfuros al momento de la cristalización (Figura 5E nicoles paralelos). **F.** Presencia de venilla con esfalerita que irrumpe la generación de calcopirita parcialmente orientada e identificada en las zonas de coloración amarilla. Abreviaturas: ccp: calcopirita; sp: esfalerita.

### Análisis de composición elemental mediante EDS

Inicialmente, se analizaron esfaleritas con bajo contenido en hierro tomando como indicador su color claro y características petrográficas. Posteriormente, se analizó la muestra con mayor contenido de esfalerita estimada petrográficamente. Los resultados revelan la presencia de abundantes carbonatos como siderita y dolomita texturalmente asociados a la esfalerita. La esfalerita particularmente está determinada por la abundancia en los análisis de elementos como azufre, hierro y zinc. En este primer análisis, un rasgo particular de este tipo de sulfuro es que por lo general tiene un color claro, característica de las esfaleritas que carecen de hierro,

lo cual se evidencia en las mediciones analíticas. Cabe anotar que solamente en 2 análisis el hierro llega a tener una concentración superior al 10 %.

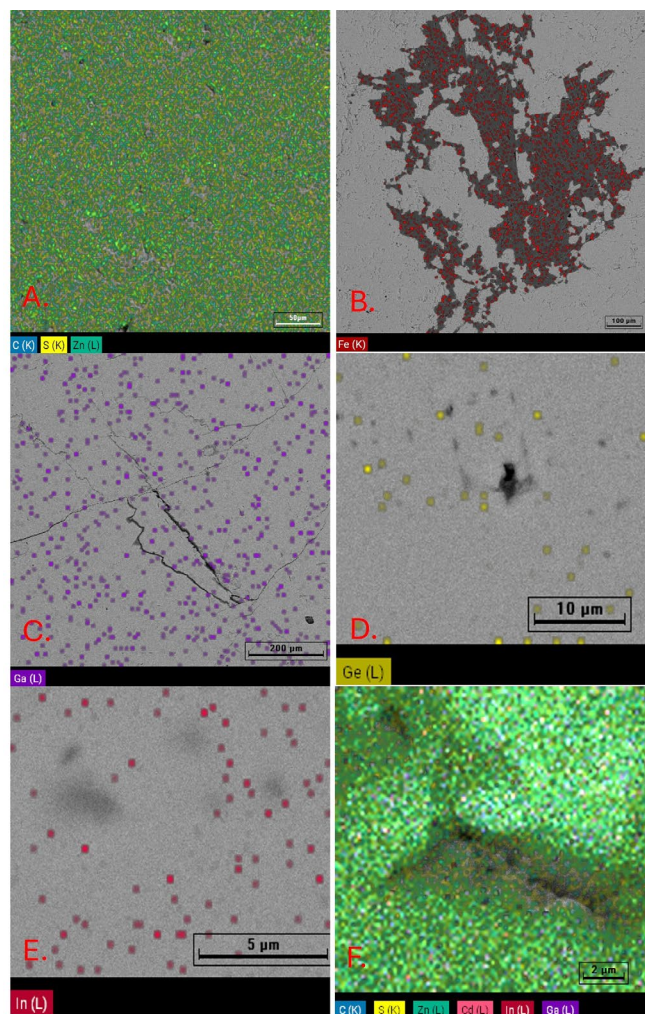
Un elemento que por lo general se encuentra estrechamente relacionado con las esfaleritas de bajo contenido de hierro es el cadmio, el cual varía entre el 0,48 % hasta 1,39 % (Tabla 2). El galio y germanio se encuentran en cantidades secundarias a traza entre 0,18 a 0,28 % y 0,08 a 0,27 %, respectivamente, y se infiere que ambos elementos se encuentran distribuidos entre la red molecular de la esfalerita y no llegan a formar minerales propiamente.

**Tabla 2.** Concentración elemental de porcentaje en peso de 10 áreas y puntos analizados donde se muestra la distribución de elementos como carbono, oxígeno, azufre, zinc, cadmio, galio, germanio, manganeso e indio. Abreviaturas: Sd: siderita; Sp: esfalerita; FeSp: esfalerita con hierro.

| Elemento/<br>Muestra | Mapa 1  | Mapa 2 | Mapa 3 | Mapa 4  | Mapa 5 | Mapa 7 | Mapa 8 | Mapa 9 | Espectro 1 | Espectro 2 |
|----------------------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| C                    | 23,76   | 31,06  | 33,47  | 24,63   | 32,82  | 32,53  | 32,63  | 37,67  | 30,89      | 24,30      |
| O                    | 11,68   |        |        | 9,57    |        |        |        |        |            | 9,17       |
| S                    | 16,45   | 21,96  | 21,17  | 18,40   | 21,50  | 21,76  | 21,73  | 18,92  | 17,20      | 18,04      |
| Fe                   | 13,10   | 3,41   | 3,22   | 10,94   | 3,09   | 2,97   | 3,18   | 2,94   | 2,29       | 10,32      |
| Zn                   | 35,01   | 42,29  | 40,61  | 34,00   | 41,04  | 41,35  | 41,09  | 39,32  | 48,74      | 36,27      |
| Cd                   |         | 1,28   | 1,20   | 1,39    | 1,26   | 0,91   | 0,93   | 0,66   | 0,48       | 1,32       |
| Ga                   |         |        | 0,21   | 0,18    | 0,21   | 0,21   | 0,18   | 0,22   | 0,28       |            |
| Ge                   |         |        | 0,12   | 0,27    | 0,08   | 0,08   | 0,09   | 0,08   | 0,12       |            |
| Mn                   |         |        |        | 0,62    |        |        |        |        |            | 0,58       |
| In                   |         |        |        |         |        | 0,19   | 0,17   | 0,19   |            |            |
| Sumatoria            | 100     | 100    | 100    | 100     | 100    | 100    | 100    | 100    | 100        | 100        |
| Mineral              | Sd + Sp | Sp     | Sp     | Sd + Sp | Sp     | Sp     | Sp     | Sp     | Sp         | FeSp       |

En la Figura 7 se observan ejemplos de los análisis reportados en la Tabla 2. En el mapa 2 (Figura 7A) se muestra la composición de la esfalerita, donde se refleja el incremento en la concentración de zinc de color verde por sobre el azufre de coloración amarilla en la imagen. En el mapa 4 (Figura 7B), además de esfalerita, se reconoce la presencia de siderita por el elevado contenido de carbono, oxígeno y hierro. Cabe anotar que esta muestra presenta la mayor concentración de germanio, cercana al 0,27 % (Tabla 2). En el mapa 5 (Figura 7C) se observa la concentración relativamente elevada de galio de hasta 0,21 %, representado por los

puntos de coloración purpura con distribución aleatoria. La distribución del germanio sobre un cristal de esfalerita (Figura 7D, mapa 8) se muestra indicado como puntos de color amarillo. La Figura 7E corresponde a otro cristal de esfalerita de color claro en la que se observa la concentración del elemento indio (*i. e.*, puntos de coloración rojiza). La Figura 7F corresponde a una imagen compuesta integrada por las imágenes composicionales del azufre, zinc, cadmio, indio, galio y carbono, en donde principalmente la coloración verdosa está dada por la concentración del elemento zinc.



**Figura 7.** Imágenes de microscopía de barrido electrónico y determinaciones EDX. **A.** Mapa 2. **B.** Mapa 4. **C.** Mapa 5. **D.** Mapa 8. **E.** Mapa 9. **F.** Imagen compuesta de los elementos carbono, azufre, zinc, cadmio, indio y galio.

El segundo análisis de esfalerita se realizó en muestras con recubrimiento de grafito debido a que el recubrimiento de oro puede enmascarar las lecturas de algunos niveles energéticos de los metales de interés. De manera general, este segundo análisis se realizó sobre los dos tipos de esfalerita: una enriquecida en hierro y otra esfalerita clara, además de calcopirita, siderita, cuarzo y parte de la roca caja que es considerada una lodolita.

Las esfaleritas ricas en hierro presentan concentraciones de este elemento mayores a 10 %, y las esfaleritas claras poseen concentraciones menores al 4 % (Tabla 3). Las concentraciones de azufre varían entre 19 y 44 % en ambos tipos de esfalerita. La calcopirita muestra valores de 30 % en hierro, 28 % en cobre y 39 % en azufre. Minerales como la siderita muestran los valores en oxígeno, carbono y hierro con algunas concentraciones menores en magnesio, calcio y manganeso. El análisis de

lodolita muestra adicionalmente elementos como carbono, oxígeno, silicio, aluminio y algunas concentraciones menores de hierro, potasio, aluminio y titanio (Tabla 3).

Gran parte del interés económico en este trabajo está cifrado en la relevancia que tienen elementos como el galio, germanio e indio. Sin embargo, un aspecto que es oportuno mencionar es que solamente la esfalerita clara es la que posee la potencialidad de albergar estos elementos de interés. De este segundo análisis solamente el punto 6 refleja un ligero incremento en germanio y galio; en la mayoría de los análisis los valores son muy bajos en el orden de 0,01 % dentro del rango del límite de detección del instrumento (Tabla 3). Sin embargo, elementos como indio reflejan un ligero incremento particularmente en los puntos como mapa 2, mapa 6 y espectro 5, en donde los valores salen por encima del rango de los 0,01 %.

**Tabla 3.** Concentración elemental de porcentaje en peso de 19 áreas y puntos analizados donde se muestra la distribución de elementos como carbono, oxígeno, azufre, zinc, cadmio, galio, germanio, manganeso, indio, magnesio, calcio, silicio, aluminio, potasio y titanio. Abreviaturas: Sd: siderita; Sp: esfalerita; FeSp: esfalerita con hierro; Ccp: calcopirita; Qz: cuarzo.

| Muestra/<br>Elemento | Mapa<br>1 | Mapa<br>2 | Mapa<br>3 | Mapa<br>4 | Mapa<br>5 | Mapa<br>6 | Mapa<br>7 | Mapa<br>9 | Mapa<br>10 | Mapa<br>11 | Punto<br>1 | Punto<br>2 | Punto<br>3 | Punto<br>4 | Punto<br>5 | Punto<br>6 | Espectro<br>1 | Espectro<br>3 | Espectro<br>5 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| C                    |           |           |           |           |           |           |           | 20,26     | 21,19      | 31,83      |            |            |            |            |            |            |               |               |               |
| O                    | 9,1       |           |           |           | 33,9      |           |           | 37,32     | 41,1       | 38,15      |            |            | 47,57      |            |            | 18,18      |               |               |               |
| S                    | 34,68     | 33,93     | 39,5      | 33,76     | 19,79     | 34,57     | 44,25     |           |            | 0,77       | 31,53      | 37,23      |            | 31,93      | 47,38      | 27,12      | 36,72         | 39,55         | 33,7          |
| Fe                   | 23,5      | 1,13      | 30,76     | 12,86     | 31,35     | 3,47      | 28,99     | 38,32     | 2,4        | 1,03       | 2,22       | 29,42      | 47         | 1,1        | 36,56      | 4,23       | 29,56         | 30,68         | 3,48          |
| Cu                   | 13,58     | 0,6       | 27,95     | 13,4      | 0,76      |           | 10,59     |           |            |            |            | 33,35      |            |            | 16,06      |            | 33,72         | 27,92         |               |
| Zn                   | 19,01     | 63,45     | 1,75      | 39,65     | 12,77     | 61,78     | 16,13     |           |            |            | 65,67      |            |            | 66,48      |            | 49,89      |               | 1,81          | 61,8          |
| Ga                   | 0,01      | 0,01      | 0,01      | 0,01      |           | 0,01      | 0,01      |           |            |            |            |            |            |            |            | 0,02       |               | 0,01          | 0,01          |
| Ge                   | 0,01      | 0,01      | 0,01      | 0,01      |           | 0,01      | 0,01      |           |            |            |            |            |            |            |            | 0,02       |               | 0,01          | 0,01          |
| Cd                   | 0,1       | 0,83      | 0,01      | 0,3       |           | 0,1       | 0,01      |           |            |            | 0,58       |            |            | 0,49       |            | 0,52       |               | 0,01          | 0,96          |
| In                   | 0,01      | 0,04      | 0,01      | 0,01      |           | 0,06      | 0,01      |           |            |            |            |            |            |            |            | 0,02       |               | 0,01          | 0,04          |
| Mg                   |           |           |           |           | 1,43      |           |           | 2,89      |            |            |            |            |            | 4,06       |            |            |               |               |               |
| Ca                   |           |           |           |           |           |           |           | 0,43      |            |            |            |            |            | 0,61       |            |            |               |               |               |
| Mn                   |           |           |           |           |           |           |           | 0,78      |            |            |            |            |            | 0,76       |            |            |               |               |               |
| Si                   |           |           |           |           |           |           |           |           | 35,31      | 18,91      |            |            |            |            |            |            |               |               |               |
| Al                   |           |           |           |           |           |           |           |           |            | 8,91       |            |            |            |            |            |            |               |               |               |
| K                    |           |           |           |           |           |           |           |           |            | 0,27       |            |            |            |            |            |            |               |               |               |
| Ti                   |           |           |           |           |           |           |           |           |            | 0,13       |            |            |            |            |            |            |               |               |               |
| Sum                  | 100       | 100       | 100       | 100       | 100       | 100       | 100       | 100       | 100        | 100        | 100        | 100        | 100        | 100        | 100        | 100        | 100           | 100           | 100           |
| Mineral              | FeSp      | Sp        | Ccp       | FeSp      | FeSp      | Sp        | FeSp      | Sd        | Sd + Qz    | Lodolita   | Sd         | Sp         | Sd         | Sp         | Ccp        | Sd + Sp    | Ccp           | Ccp           | Sp            |

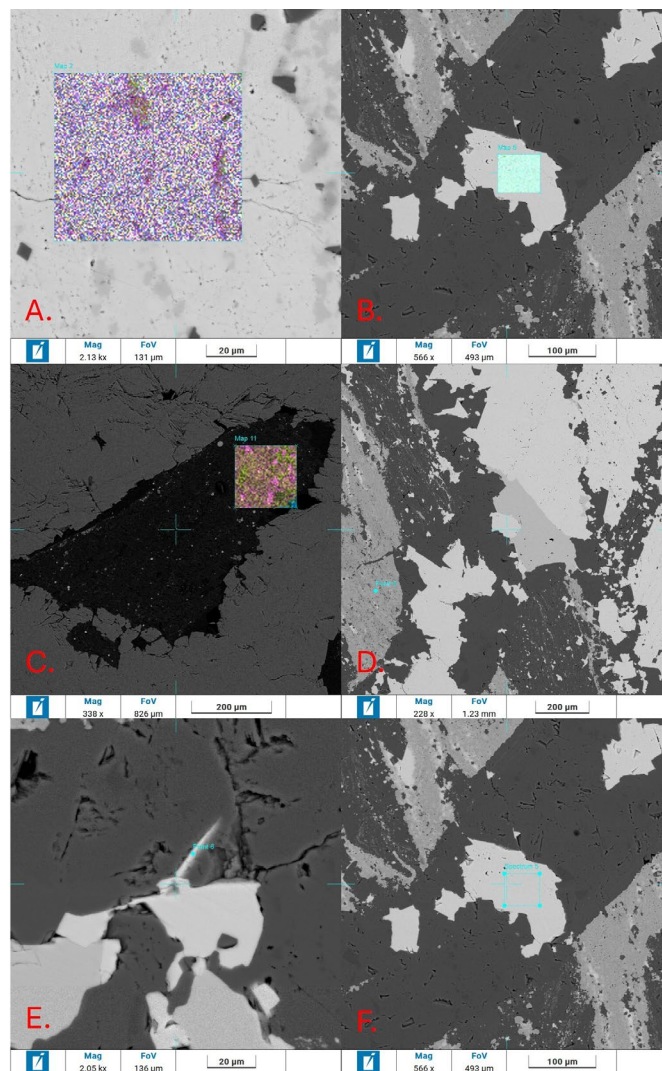
En la **Figura 8A** se observa una de las esfaleritas claras con concentración relativamente elevada de cadmio de 0,83 % (**Tabla 3**), además de indio en una concentración de 0,04 %. El mapa donde aparece la distribución de los diferentes colores indica la distribución de elementos como galio, la cual es muy similar a la que presenta el zinc.

La **Figura 8B** muestra la concentración de indio alrededor de 0,06 % encontrado en medio de la esfalerita clara. En la imagen se destaca la distribución del zinc de un color azul cian.

La **Figura 8C** muestra la ocurrencia de fragmentos de lodolita, lo cual se manifiesta en la concentración de elementos como carbono, oxígeno, silicio, aluminio, potasio y titanio. Un aspecto interesante es que incluso este tipo de fragmentos en la imagen conserva parte de la

orientación clásica proveniente de la estructura principal de tipo sedimentario, como laminación. Así mismo, algunos puntos diseminados de color brillante al interior de esta roca corresponden a sulfuros del tipo pirita.

La **Figura 8D** muestra las características geoquímicas de la calcopirita, representada por una concentración de elementos como azufre, hierro y cobre. La **Figura 8E** evidencia esfalerita en conjunto con algunos cristales de siderita, y es el análisis donde mayor concentración de elementos como galio, germanio e indio se presenta. Es importante recalcar que en este punto el cadmio llega a representar valores de 0,52 %. Finalmente, la **Figura 8F** muestra una de las esfaleritas claras con un abundante contenido en cadmio y particularmente indio, donde este último elemento llega a tener valores de 0,04 %.



**Figura 8.** Imágenes de microscopía de barrido electrónico y determinaciones EDX. **A.** Mapa 2. **B.** Mapa 6. **C.** Mapa 11. **D.** Punto 5. **E.** Punto 6. **F.** Espectro 5.

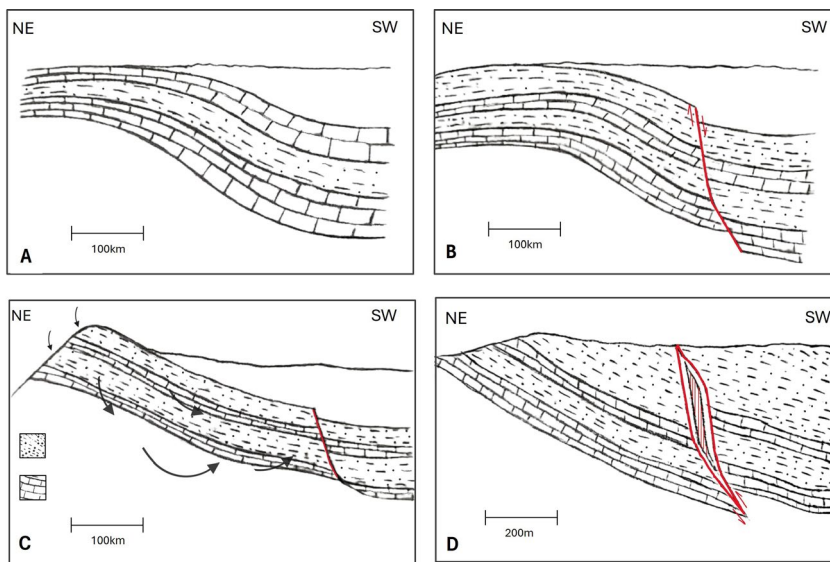
## Discusión

La sucesión de eventos propuesta para explicar la ocurrencia mineral encontrada en la vereda Caldas, objeto de esta investigación, se resume en la [Figura 9](#). En primer lugar, se evidencia un evento inicial que corresponde a la depositación de capas de arenisca y carbonatos en uno de los flancos de la cuenca sedimentaria cretácica ([Figura 9A](#)). Posteriormente, se generó un evento de fallamiento extensivo local, posiblemente asociado con un evento extensivo de mayor escala, que generó una apertura en medio de las unidades sedimentarias ([Figura 9B](#)). En este contexto, se propone la generación del fluido mineralizante, comúnmente formado por la mezcla de aguas connatas con fluidos de diferentes fuentes, incluidas aguas meteóricas ([Leach et al., 2010](#)).

En estos ambientes de salmueras, los complejos clorurados pueden atrapar y transportar metales base, como Pb, Zn, además de Ge, Ga e In. Estos complejos permiten la remoción de los metales desde la cuenca para así depositarlos en ambientes distintos donde precipitan debido a diferencias en temperatura, condiciones de acidez y, principalmente, en el estado de oxidación-reducción ([Marsh et al., 2016](#)), lo que determina la generación de minerales en forma de sulfuros ([Figura 9C](#)). Otra posibilidad para generar esta removilización consiste en la movilización de metales en ambientes de salmueras asociados a evaporitas dentro de la cuenca ([Emsbo, 2009](#)), y que derivado de un evento posterior de óxido-reducción pueden precipitar también a manera

de sulfuros. Dichos sulfuros corresponden a esfaleritas de dos generaciones (clara y oscura), calcopirita y pirita. Producto de un evento tectónico derivado de la inversión de estructuras, anteriormente definidas como fallas normales, se produce el emplazamiento de carbonatos. Lo anterior resulta de la removilización de las facies de calizas además de los sulfuros anteriormente mencionados dentro de los cuales se encuentran estos elementos de transición Ga, Ge e In ([Figura 9D](#)).

La depositación de las unidades sedimentarias pertenecientes a la Formación Areniscas del Chiquinquirá y la Formación Simití se dio durante el Cretácico. Por un lado, la Formación Chiquinquirá está compuestas de facies arenosas y lutíticas, principalmente, mientras que la Formación Simití cuenta con intercalaciones de lodolitas y areniscas con unidades calcáreas de manera localizada. Las muestras tomadas en campo denotan el encuentro de estas formaciones, ya que se obtuvieron muestras de lodolitas, areniscas lodosas y carbonatos. Se estima que esta depositación ocurrió en los flancos de la cuenca cretácica. Según [Sarmiento-Rojas \(2002\)](#), estas cuentan con las características estructurales al coincidir con fallas inversas que originalmente eran fallas normales, pero durante la formación de la Cordillera Oriental estas fueron reactivadas generando así su inversión. A su vez, estas fallas inversas se caracterizan por ser zonas de debilidad, ya que a lo largo de estas cambia notablemente el espesor de las unidades y las facies sedimentarias permitiendo el ascenso de fluidos mineralizantes ([Sarmiento-Rojas, 2002](#)).



**Figura 9.** Ilustración que muestra la sucesión de eventos propuesta para explicar el origen de la ocurrencia mineral estudiada en la vereda Caldas. **A.** Depositación de las formaciones Areniscas del Chiquinquirá y Simití. **B.** Falla normal que atraviesa las unidades sedimentarias. **C.** Fuentes del fluido mineralizante que generan la removilización de metales y posterior mineralización de sulfuros. Modificado de [Emsbo \(2009\)](#). **D.** Emplazamiento de carbonatos y sulfuros que integran los metales críticos durante la inversión del fallamiento normal previo.

La generación de la apertura que dio lugar a la mineralización se asocia con una zona distensiva, denominada de tal forma principalmente por su extensión, que a su vez se relaciona posiblemente con un fallamiento de mayor escala, ya que esta región se caracteriza por tener cabalgamientos, plegamientos y demás estructuras que denotan la influencia tectónica sobre la zona (Mora *et al.*, 2006).

La infiltración de aguas meteóricas, sumada a las aguas connatas, representa una fuente importante para la generación del fluido mineralizante (Marsh *et al.*, 2016). Una vez la roca es expuesta a condiciones cercanas a la superficie, los elementos metálicos pueden moverse a través de compuestos clorurados en medio de salmueras, las cuales pueden ser eventualmente neutralizadas por las aguas ácidas generadas durante la meteorización de la roca huésped. Este proceso favorece la formación de mineralizaciones y su concentración en zonas controladas estructuralmente como la que se reconoce en el área de estudio.

La removilización de metales que permite la precipitación de metales base como el Pb-Zn depende principalmente del pH, eH y la temperatura (Leach *et al.*, 2010). Particularmente en el área de trabajo, este estado de óxido-reducción en las especies sulfuradas se evidencia en la precipitación de minerales como pirita, calcopirita, goethita, rutilo y óxidos de hierro amorfo. Estos fluidos se movilizan debido al gradiente geotérmico y eventos relacionados con los cambios en la topografía de origen tectónico. Un aspecto interesante que se observó en la veta analizada fue que se encontró calcopirita en la base de la mineralización, lo que sugiere la participación de la temperatura como un agente físico determinante en la variedad mineralógica presente en las muestras analizadas. De acuerdo con lo anterior, y con lo observado en el orden de crecimiento de los sulfuros en las descripciones petrográficas, se sugiere que posterior a este evento de removilización de metales y precipitación de sulfuros sobrevino un evento de mayor temperatura que permitió la cristalización de una segunda generación de calcopirita foliada que integra a su vez partes de la esfalerita rica en Fe.

Los vestigios del evento hidrotermal que culminó en el emplazamiento de carbonatos y sulfuros objeto de este estudio se observan tanto en la roca caja como en la mineralización propiamente. La asociación mineralógica de cuarzo euhedral, que alcanza tamaños milimétricos y en ocasiones tiene un hábito prismático, con las hojuelas de sericita-clorita junto con algunos cristales de esfalerita observados en la muestra cal-3

evidencian el paso de un fluido hidrotermal. A su vez, las bandas de esfaleritas y carbonatos observadas en la muestra sid-1 también cuentan con estas venillas de cuarzo euhedral paralelas al bandeo de la muestra; este bandeo es consistente con la naturaleza estratiforme de los depósitos MVT.

El emplazamiento de estos sistemas a menudo involucra procesos que se vinculan a la precipitación de sulfuros, tales como el relleno de espacios abiertos y el reemplazamiento o disolución de la roca huésped. Estos procesos generan texturas presentes en las muestras de material de vena principalmente, que a menudo son de naturaleza brechoide, con cristales de carbonatos y sulfuros y texturas de bandeamiento milimétrico, que alternan carbonatos, sulfuros y venillas de cuarzo. A su vez, también se observan texturas que denotan una influencia estructural al encontrarse en una zona local de apertura. Dentro de estas texturas se observa la foliación de las capas de calcopirita y esfalerita y la deformación de ciertas hojuelas de moscovita en las muestras de lodolita arenosa.

Las dos variedades de esfalerita estudiadas permitieron observar la tendencia esperada de alojamiento de metales críticos tales como el Ga, Ge e In. La variedad más abundante corresponde a la esfalerita clara, que a partir de los análisis de química mineral se determinó que cuenta con una concentración baja en Fe, a diferencia de la variedad más oscura que mostraba un mayor contenido de este metal. Acorde con la literatura (Cook *et al.*, 2009; Frenzel *et al.*, 2016), los minerales como el Ga e In tienen una tendencia por precipitar en ambientes de baja temperatura al igual que la esfalerita baja en Fe. Por otro lado, el In tiene una preferencia por los ambientes de mayor temperatura. Fue posible identificar esta tendencia en el análisis de química mineral de la esfalerita más oscura, que indica un ambiente de mayor temperatura, donde el Ga y Ge se encontraban a concentraciones muy bajas en casi todos los puntos tomados y el In tenía una mayor concentración. Finalmente, el Ga, Ge e In se presentan distribuidos a lo largo de la estructura cristalina de la esfalerita y no formando minerales propiamente.

En el caso de la Cordillera Oriental de Colombia, Mojica-Boada *et al.* (2022), con base en perfiles de funciones receptoras telesísmicas, indica la existencia de una discontinuidad en la corteza inferior y en el Moho bajo el área del presente estudio. Con base en estos resultados, se sugiere que la ocurrencia mineral discutida en el presente estudio, y potencialmente otras manifestaciones hidrotermales en la Cordillera Oriental,

como los cinturones esmeraldíferos (e.g., Ottaway *et al.*, 1994; Cheilletz y Giuliani, 1996) podrían reflejar un aporte de fluidos hidrotermales con origen en el basamento cratónico que se infiltraron a lo largo de estructuras preandinas heredadas en la arquitectura basal de la cordillera.

## Conclusiones

Sobre la vereda Caldas, parte del municipio de Chiquinquirá, Boyacá, se encuentra el objeto de este estudio, que corresponde a una ocurrencia mineral en forma de veta, compuesta principalmente por carbonatos y sulfuros, la cual se considera un MVT. Esta, además de albergar metales base como plomo (Pb) y zinc (Zn), tiene la potencialidad de albergar metales como germanio (Ge), galio (Ga) e indio (In), los cuales tienen un alto interés económico.

Estos sulfuros se emplazan en medio de rocas de edad cretácica, cuyo origen es sedimentario de tipo clástico y localmente calcáreo. Producto de los eventos de meteorización de estas unidades sedimentarias clásticas, especialmente unidades de lodolitas que son consideradas reservorios de varios tipos de elementos químicos en especial de metales, se produce la lixiviación de dichos metales en soluciones acuosas naturales.

La movilización de estas aguas impregnadas en metales a través de cuencas sedimentarias hace que potencialmente durante su recorrido se encuentren con un ambiente propicio que desencadene la precipitación de estos metales en forma de sulfuros como esfalerita o calcopirita.

Las determinaciones geoquímicas de este trabajo permiten establecer que elementos como galio (Ga), germanio (Ge) e indio (In) se encuentran principalmente en las esfaleritas de color claro, en donde también es común encontrar cadmio, tendencia que coincide con las previas investigaciones presentes en la literatura.

El escenario geológico de este estudio, y especialmente la clase de rocas estudiadas, cuenta con la potencialidad de albergar elementos económicos de interés, por lo que se podría convertir en un indicador geológico de exploración regional para la prospección de este tipo de elementos químicos. Los resultados encontrados en este estudio serán la base para estudios más detallados futuros donde se abordarán características relacionadas con la génesis, además de servir como las primeras contribuciones a los trabajos de prospección de estos

elementos, especialmente en ocurrencias minerales localizadas en la Cordillera Oriental de Colombia.

## Agradecimientos

Esta investigación forma parte del trabajo de tesis de la autora principal, Valentina Peralta-Lozada, bajo la dirección de los profesores Andrés Rodríguez-Vargas y Bogdan Nătescu. Los autores agradecen a la Universidad de Los Andes y a sus instalaciones que hicieron posible la realización de este trabajo, así como al laboratorio INCLAY SAS por los servicios analíticos ofrecidos que permitieron la obtención de gran parte de los resultados. Finalmente, se extiende este agradecimiento a los revisores por sus valiosas sugerencias y comentarios que contribuyeron a fortalecer este estudio.

## Referencias

- Arndt, N.; Ganino, C. (2012). Hydrothermal Deposits. In: *Metals and Society: An Introduction to Economic Geology* (pp. 73-112). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22996-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22996-1_4)
- Bauer, M.E.; Burisch, M.; Ostendorf, J.; Krause, J.; Frenzel, M.; Seifert, T.; Gutzmer, J. (2019). Trace element geochemistry of sphalerite in contrasting hydrothermal fluid systems of the Freiberg district, Germany: Insights from LA-ICP-MS analysis, near-infrared light microthermometry of sphalerite-hosted fluid inclusions, and sulfur isotope geochemistry. *Mineralium Deposita*, 54(2), 237-262. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0850-0>
- Cheilletz A.; Giuliani G. (1996). The genesis of Colombian emeralds: a restatement. *Mineralium Deposita*, 31(5), 359-364. <https://doi.org/10.1007/BF00189183>
- Colletta, B.; Hebrard, F.; Letouzey, J.; Werner, P.; Rudkiewicz, J.L. (1990). Tectonic style and crustal structure of the Eastern Cordillera (Colombia) from a balanced cross-section. In: J. Letouzey (ed.) *Petroleum and Tectonics in Mobile Belts* (pp. 81-100). Editions Technip.
- Cook, N.J.; Ciobanu, C.L.; Pring, A.; Skinner, W.; Shimizu, M.; Danyushevsky, L.; Saini-Eidukat, B.; Melcher, F. (2009). Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(16), 4761-4791. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045>

- Cook, N.J.; Ciobanu, C. (2015). Mineral Hosts for Critical Metals in Hydrothermal Ores. *13th SGA Biennial Meeting*, Nancy, France.
- Cooper, M.A.; Addison, F.T.; Alvarez, R.; Coral, M.; Graham, H.; Hayward, A.B.; Howe, S.; Martinez, J.; Naar, J.; Peñas, R.; Pulham, A.J.; Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, 79(10), 1421-1442. <https://doi.org/10.1306/7834D9F4-1721-11D7-8645000102C1865D>
- Dunham, R.J. (1962). Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. In: W.E. Ham (ed.). *Classification of Carbonate Rocks – A symposium* (pp. 108-121). AAPG.
- Emsbo, P. (2009). Geologic criteria for the assessment of sedimentary exhalative (sedex) Zn-Pb-Ag deposits. In: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009–1209, 21.
- Forero-Suárez, A. (1990). The basement of the Eastern Cordillera, Colombia: an allochthonous terrane in northwestern South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(2-3), 141-151. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(90\)90026-W](https://doi.org/10.1016/0895-9811(90)90026-W)
- Frenzel, M.; Hirsch, T.; Gutzmer, J. (2016). Gallium, germanium, indium, and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type—A meta-analysis. *Ore Geology Reviews*, 76, 52-78. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.12.017>
- Fuquen, J.A.; Osorno, J.F. (2005). Geología de la Plancha 190, Chiquinquirá. Comprende mapa a escala 1: 100.000.
- Graedel, T.E.; Harper, E.M.; Nassar, N.T.; Reck, B.K. (2015). On the materials basis of modern society. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(20), 6295-6300. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312752110>
- Horton, B.K.; Parra, M.; Saylor, J.E.; Nie, J.; Mora, A.; Torres, V.; Stockli, D.F.; Strecker, M.R. (2010a). Resolving uplift of the Northern Andes using detrital zircon age signatures. *GSA Today*, 20(7), 4-10. <https://doi.org/10.1130/GSATG76A.1>
- Horton, B.K.; Saylor, J.E.; Nie, J.; Mora, A.; Parra, M.; Reyes-Harker, A.; Stockli, D. (2010b). Linking sedimentation in the Northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U–Pb ages in the Eastern Cordillera of Colombia. *GSA Bulletin*, 122(9-10), 1423-1442. <https://doi.org/10.1130/B30118.1>
- Horton, B.K.; Parra, M.; Mora, A. (2020). Construction of the Eastern Cordillera of Colombia: Insights from the sedimentary record. In: J. Gómez, D. Mateus-Zabala (eds). *The Geology of Colombia* (pp. 67-88). Vol. 3. Chapter 3. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.03>
- Huston, D.L.; Bastrakov, E. (2024). Germanium, indium, gallium and cadmium in zinc ores: A mineral system approach. *Australian Journal of Earth Sciences*, 71(8), 1125-1155. <https://doi.org/10.1080/08120099.2024.2423772>
- Leach, D.L.; Bradley, D.; Lewchuk, M.T.; Symons, D.T.; de Marsily, G.; Brannon, J. (2001). Mississippi Valley-type lead–zinc deposits through geological time: Implications from recent age-dating research. *Mineralium Deposita*, 36(8), 711-740. <https://doi.org/10.1007/s001260100208>
- Leach, D.L.; Taylor, R.D.; Fey, D.L.; Diehl, S.F.; Saltus, R.W. (2010). A deposit model for Mississippi Valley-Type lead-zinc ores. Scientific Investigations Report 2010-5070-A. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sir20105070A>
- Licht, C.; Peiró, L.T.; Villalba, G. (2015). Global substance flow analysis of gallium, germanium, and indium: Quantification of extraction, uses, and dissipative losses within their anthropogenic cycles. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), 890-903. <https://doi.org/10.1111/jiec.12287>
- Marsh, E.; Hitzman, M.; Leach, D. (2016). Critical elements in sediment-hosted deposits (clastic-dominated Zn-Pb-Ag, Mississippi Valley-Type Zn-Pb, sedimentary rock-hosted stratiform Cu, and carbonate-hosted polymetallic deposits): A review. In: P.L. Verplanck, M.W. Hitzman (eds.). *Rare earth and critical elements in ore deposits: Reviews in Economic Geology* (pp. 307-321). Vol. 18. Society of Economic Geologists.

- Mojica-Boada, M.J.; Poveda, E.; Tary, J.B. (2022). Lithospheric and slab configurations from receiver function imaging in northwestern South America, Colombia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(12), e2022JB024475. <https://doi.org/10.1029/2022JB024475>
- Mora, A.; Parra, M.; Strecker, M.R.; Kammer, A.; Dimaté, C.; Rodríguez, F. (2006). Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. *Tectonics*, 25(2). <https://doi.org/10.1029/2005TC001854>
- Nassar, N.T.; Graedel, T.E.; Harper, E.M. (2015). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances*, 1(3), e1400180. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400180>
- Ottaway, T.L.; Wicks, F.J.; Bryndzia, L.T.; Kyser, T.K.; Spooner, E.T.C. (1994). Formation of the Muzo hydrothermal emerald deposit in Colombia. *Nature*, 369, 552-554. <https://doi.org/10.1038/369552a0>
- Rudnick, R.L.; Gao, S. (2014). Composition of the continental crust. In: H. Holland, K. Turekian (eds.). *Treaties on geochemistry* (pp. 1-51). Chapter 4.1. 2nd edition. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Sarmiento-Rojas, L.F. (2002). Condiciones geológicas favorables de las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia para la existencia de depósitos exhalativos submarinos de Plomo y Zinc. *Boletín de Geología*, 24(39), 49-72.
- Sepúlveda, J.; Celada, C.M.; Murillo-Bohórquez, H.; Rodríguez-Vargas, A.; Gómez-Casallas, M.; Prieto-Gómez, D.; Jiménez-Torres, C.A.; Rache-Rodríguez, A. (2020). Memoria Explicativa Mapa Metalogénico de Colombia. Comprende mapa a escala 1:1:500.000 y memoria explicativa.
- Stoiber, R.E. (1940). Minor elements in sphalerite. *Economic Geology*, 35(4), 501-519. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.35.4.501>
- Terraza-Melo, R. (2012). Estratigrafía y ambientes de depósito de la arenisca de Chiquinquirá en los alrededores de la localidad tipo. *Boletín de Geología*, 34(2), 55-72.
- Ward, D.E.; Goldsmith, R.; Cruz, J.; Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1-134. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol21.1-3.1973.383>
- Whitney, D.L.; Evans, B.W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1), 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Ye, L.; Cook, N.J.; Ciobanu, C.L.; Yiping, L.; Qian, Z.; Tiegeng, L.; Wei, G.; Yulong, Y.; Danyushevskiy, L. (2011). Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study. *Ore Geology Reviews*, 39(4), 188-217. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.03.001>
- Zheng, K.; Benedetti, M.F.; Van Hullebusch, E.D. (2023). Recovery technologies for indium, gallium, and germanium from end-of-life products (electronic waste) – A review. *Journal of Environmental Management*, 347, 119043. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119043>

---

---

Fecha de recibido: 25 de octubre de 2024

Fecha de aceptado: 14 de noviembre de 2025

---

---