



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Mineralogía y estructuras  
mineralizadas de la mina "La  
Ojuela", Mapimí, Durango.**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Geólogo**

**P R E S E N T A**

Jorge Ramón Mendoza Zurita

**DIRECTOR DE TESIS**

Ing. Alfredo Victoria Morales



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023**

*Para los que fueron, formaron y formarán  
parte de esta aventura.*

## *Agradecimientos*

Quiero agradecer al proyecto PAPIME Manual de Mineralogía, Cuaderno de prácticas de laboratorio de Mineralogía y Guía de excursiones a localidades mineralógicas de México con clave PE101320 por la beca otorgada para la realización de este proyecto, así como la inclusión del trabajo a la Guía de excursiones.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el conocimiento y enseñanzas para mi formación personal y ser mi segunda casa el tiempo de mi estadía.

A mis papás por el apoyo que siempre me han brindado para poder realizar mis estudios. A mi papá por su apoyo y enseñanza en todo momento, por acompañarme al campo y hacer siempre todo lo posible para que este bien en todo aspecto. A mi mamá por estar en todo momento para mí y quien siempre ha creído y dio parte de mis logros.

A mi director de tesis el Ing. Alfredo Victoria Morales por invitarme a la participación del cuaderno, sus enseñanzas continuas en la elaboración de este trabajo, fomentar la divulgación de mi trabajo en diferentes convenciones, por estar al tanto de mi como persona en la pandemia y esperarme para mi titulación que tardó más de lo esperado.

A la Ing. Karina Martínez Bautista quien siempre me apoyó y ayudó a la descripción de mis láminas, además de hacer más sencillo y divertido venir al cubículo. Que sea la primera de muchas tesis de la que formes parte.

A mis sinodales por el apoyo y tiempo para las mejoras continuas de esta tesis. Al Mtro. Alatorre que me hizo descubrir el mundo de los minerales industriales, por sus correcciones de mi redacción, a la Quím. Patricia Girón García por su tiempo, enseñarme DRX en tiempo récord junto con sus ayudante Kenia quien tuvo la paciencia de ayudarme a encontrar los diferentes minerales de la muestra en especial la calcosiderita que tanto nos costó. Al Ing. Francisco Javier Medina Escutia por brindarme su tiempo y apoyo en la revisión del trabajo.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

En memoria del Dr, Carlos Schulze quien formó parte de mis sinodales, del que estoy seguro le hubiera entusiasmado leer el trabajo y me hubiera contado alguna experiencia de la zona que de seguro habrá tenido.

Al Mtro. Luis Espinosa por abrirme las puertas del Museo de Geología y al Ing. Óscar Irazaba por facilitarme, ayudarme y guiarme con los minerales de la Colección Geográfica descritos en esta tesis.

A Chef, que gracias a él llegue a esta tesis y a mi primer trabajo como geólogo en Moro. Al Mtro. Raúl Morales por brindarme la oportunidad de trabajar con usted, Ing. Uriel por ser mi primer jefe y darme consejos de como avanzar en mi titulación, a Ing. Enrique e Ing. Carlos por apoyarme en todo momento para lo que necesitara.

A Adri una gran amiga que quiero mucho que ha sido un apoyo muy grande para mí en todo momento, a Mich en quien encontré una amistad sincera y apoyó en los momentos difíciles, Ariz, Clau y Kim por sus palabras de aliento y apoyo. A Daniela mi copia desde CCH con la que he compartido grandes momentos.

A Ramses y Perci quienes han sido mis mejores amigos junto con Chef, por compartir tantos momentos juntos y apoyarme en mis momentos más difíciles durante y después de la carrera

A Macedo por acompañarme a Mapimí para mi trabajo de campo, al Sr Gibran quien fue el contacto que nos facilitó la entrada a la mina y la toma de muestras. Aunque parezca broma a la chiva que dio su vida en el regreso a la CDMX que fue una de las razones por las que no desistí en esta tesis.

A mis amigos Mario, Caracheo Payo, Rejón, Ñeric, Ñedher y mis hijos Daniboy junto Panesote por compartir conmigo su amistad y varios momentos de estos últimos casi 8 años.

A las personas que no nombré y fueron parte del proceso durante estos años se los agradezco por el tiempo que compartieron conmigo.

## Índice

I. Introducción .....	i
II. Abstract .....	iii
1. Generalidades .....	1
1.1 Objetivos y alcances. ....	1
1.2 Localización.....	2
1.3 Historia del distrito minero.....	4
1.4 Modelo de yacimiento: Reemplazamiento de carbonatos. ....	7
1.5 Metodología de trabajo.....	11
1.5.1 Recopilación de información.....	11
1.5.2 Trabajo de campo .....	11
1.5.3 Muestreo .....	11
1.5.4 Análisis petrográfico.....	12
1.5.5 Difracción de rayos X.....	14
2. Marco geológico.....	16
2.1 Evolución tectónica. ....	16
2.2 Zona metalogenética.....	18
2.3 Estratigrafía. ....	19
2.3.1 Jurásico .....	19
2.3.2 Cretácico.....	22
2.3.3 Cenozoico .....	28
2.3.4 Cuaternario .....	30
3. Geología local.....	32
3.1 Estratigrafía. ....	32
3.1.1 Jurásico .....	32
3.1.2 Cretácico.....	34
3.1.3 Cenozoico .....	38
3.1.4 Cuaternario .....	44
3.2 Geología estructural.....	45
3.3 Descripción de la mina “La Ojuela”.....	48
3.4 Descripción estructuras mineralizadas. ....	51
4. Técnicas analíticas.....	55
4.1 Petrografía y mineragrafía.....	55
4.1.1 Muestra JM-01.....	55
4.1.2 Muestra JM-04.....	56

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

4.1.3 Muestra JM-09.....	57
4.1.4 Muestra JM-10.....	58
4.1.5 Muestra JM-12.....	59
4.1.6 Muestra JM-15.....	60
4.1.7 Muestra JM-18.....	61
4.1.8 Muestra JM-19.....	62
4.1.9 Muestra JM-24.....	63
4.1.10 Muestra JM-25.....	64
4.1.11 Muestra JM-28.....	65
4.1.12 Muestra JM-29.....	66
4.1.13 Muestra JM-32.....	67
4.1.14 Muestra JM-33.....	68
4.1.15 Muestra JM-42.....	69
4.1.16 Muestra JM-52.....	70
4.2 Difracción de rayos X.....	71
4.2.1 Muestra JM-18.....	71
4.2.2 Muestra JM-60.....	72
4.2.3 Muestra JM-65.....	73
5. Descripción de minerales.....	74
5.1 Nativos.....	76
5.1.1 Cobre Cu.....	76
5.1.2 Plata.....	76
5.1.3 Oro Ag.....	76
5.2 Sulfuros.....	77
5.2.1 Enargita $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ .....	77
5.2.2 Calcopirita $\text{CuFeS}_2$ .....	77
5.2.3 Arsenopirita $\text{FeAsS}$ .....	78
5.2.4 Pirita $\text{FeS}_2$ .....	78
5.2.5 Galena $\text{PbS}$ .....	79
5.2.6 Esfalerita $\text{ZnS}$ .....	80
5.3 Óxidos e hidróxidos.....	81
5.3.1 Hematita $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	81
5.3.2 Criptomelano $\text{K}(\text{Mn}^{4+}_7 \text{Mn}^{3+})\text{O}_{16}$ .....	81
5.3.3 Pirolusita $\text{MnO}_2$ .....	82
5.3.4 Plattnerita $\text{PbO}_2$ .....	82
5.3.5 Goethita $\text{FeO}(\text{OH})$ .....	83
5.3.6 Calcofanita $\text{ZnMn}^{4+}_3\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ .....	84

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

5.4 Haluros. ....	85
5.4.1 Fluorita $\text{CaF}_2$ .....	85
5.5 Carbonatos. ....	86
5.5.1 Rosasita $(\text{Cu,Zn})_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ .....	86
5.5.2 Auricalcita $(\text{Zn,Cu})_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ .....	86
5.5.3 Aragonita $\text{CaCO}_3$ .....	87
5.5.4 Calcita $\text{CaCO}_3$ .....	88
5.5.5 Malaquita $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ .....	89
5.5.6 Azurita $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ .....	89
5.5.7 Siderita $\text{FeCO}_3$ .....	90
5.5.8 Cerusita $\text{PbCO}_3$ .....	90
5.5.9 Hidrocincita $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ .....	91
5.5.10 Smithsonita $\text{ZnCO}_3$ .....	92
5.6 Sulfatos, Vanadatos y Molibdatos. ....	93
5.6.1 Barita $\text{BaSO}_4$ .....	93
5.6.2 Brochantita $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$ .....	93
5.6.3 Vanadinita $\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$ .....	94
5.6.4 Descloizita $\text{Pb}_5(\text{VO}_4)(\text{OH})$ .....	94
5.6.5 Wulfenita $\text{Pb}(\text{MoO}_4)$ .....	95
5.7 Fosfatos y Arseniatos.....	96
5.7.1 Arsenodescloizita $\text{PbZn}(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ .....	96
5.7.2 Conicalcita $\text{CaCu}(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ .....	96
5.7.3 Austinita $\text{CaZn}(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ .....	97
5.7.4 Lotharmeyerita $\text{CaZn}_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	98
5.7.5 Parasimplesita $\text{Fe}^{2+}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$ - Kottigita $\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ .....	99
5.7.6 Escorodita $\text{Fe}^{3+}\text{AsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	100
5.7.7 Miguelromeroita $\text{Mn}_5(\text{AsO}_4)_2(\text{HAsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .....	100
5.7.8 Mimetita $\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$ - Piromorfita $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ .....	101
5.7.9 Adamita $\text{Zn}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ .....	102
5.7.10 Paradamita $\text{Zn}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ .....	104
5.7.11 Legrandita $\text{Zn}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ .....	104
5.7.12 Mapimita $\text{Zn}_2\text{Fe}^{3+}_3(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .....	106
5.7.13 Ojuelaita $\text{ZnFe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .....	106
5.8 Silicatos. ....	108
5.8.1 Caolinita $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ .....	108
5.8.2 Cuarzo $\text{SiO}_2$ .....	108
5.8.3 Hemimorfita $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .....	109

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

6. Fichas minerales representativos de La Ojuela .....	110
6.1 Rosasita $(\text{Cu,Zn})_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ .....	110
6.2 Auricalcita $(\text{Zn,Cu})_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ .....	111
6.3 Descloizita $\text{Pb}_5(\text{VO}_4)(\text{OH})$ .....	111
6.4 Conicalcita $\text{CaCu}(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ .....	112
6.5 Austinita $\text{CaZn}(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ .....	112
6.6 Lotharmeyerita $\text{CaZn}_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	113
6.7 Serie de Parasimplesita $\text{Fe}^{2+}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$ - Kottigita $\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ .....	113
6.8 Miguelromeroita $\text{Mn}_5(\text{AsO}_4)_2(\text{HAsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .....	114
6.9 Adamita $\text{Zn}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ .....	115
6.10 Paradamita $\text{Zn}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ .....	115
6.11 Legrandita $\text{Zn}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ .....	116
6.12 Mapimita $\text{Zn}_2\text{Fe}^{3+}_3(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .....	116
6.13 Ojuelaita $\text{ZnFe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .....	117
7. Conclusiones.....	118
8. Bibliografía.....	121
9. Anexo .....	124

## I. Introducción

En el actual trabajo se presenta una descripción de algunos minerales del Distrito Minero de Mapimí, específicamente de la mina “La Ojuela” en Durango. Esta es una localidad famosa por sus arseniatos calidad museo, asimismo tiene una gran diversidad mineralógica en la que existen más de 140 diferentes tipos minerales.

Mapimí ha sido poco investigado y menos aún por los mismos mexicanos, por lo cual el objetivo de este trabajo es dar a conocer la gran diversidad de los especímenes mineralógicos. Esta investigación es parte del libro Guía de excursiones a localidades mineralógicas de México del proyecto PAPIME 101320 de la Facultad de Ingeniería UNAM.

La historia de este distrito minero se remonta a la etapa colonial en el siglo XVI dónde se extraían plata, plomo, zinc y un poco de oro, pasó de mano en mano hasta llegar a pertenecer a la conocida Industrias Peñoles, siendo este distrito el que en el siglo XIX impulsó a Peñoles a la gran minera que es en la actualidad. Fue hasta principios del siglo XX explotada a gran escala, cuenta con más de 100 km de obras mineras y una profundidad de hasta 800 metros.

La mina “La Ojuela” corresponde a un yacimiento de tipo reemplazamiento de carbonatos (Carbonates and Replacement Deposits CRD) que consiste en mantos y chimeneas ricas en sulfuros encajonados en rocas carbonatadas. Se encuentra en la provincia fisiográfica de Cuencas y Sierras: consiste en sierras tanto angostas y anchas limitadas por amplios valles producto de la erosión.

La geología del yacimiento corresponde a una secuencia de calizas masivas y en partes fosilíferas del Cretácico muy deformadas que se correlacionan con la Fm. Aurora. Esta secuencia carbonatada está intrusionada por varios intrusivos, siendo el más famoso El Sarnoso de composición granodiorítica con una edad de 35 Ma (García Padilla & Millán

Quezada, 2004) aflora en el centro de la Sierra de Mapimí el cuál presenta un alto contenido de arsénico evidenciado por la presencia de arsenopirita diseminada, asimismo se encuentran diques de pórfidos andesíticos y una diorita de turmalina con nula mineralización económica.

La mina cuenta con 16 niveles (Gibrán, comunicación personal, 18 de julio de 2022) de los cuales solo los primeros cinco son accesibles y los otros 14 se encuentran inundados, lo que ha favorecido a ser explorada e investigada con el objeto de entender la gran variedad mineralógica.

La zona en que se enfoca el estudio es en la parte superior del yacimiento que corresponde a los primeros niveles y son las áreas oxidadas; donde agentes exógenos interactuaron con varias de las chimeneas lo que propició y potenció la generación de una gran diversidad de minerales.

## II. Abstract

In this work, a description of some minerals from the Mapimí Mining District is presented, specifically from the "La Ojuela" mine in Durango. This is a town famous for its museum-quality arsenates, it also has a great mineralogical diversity in which there are more than 140 different types of minerals.

Mapimí has been little investigated and even less by the Mexicans themselves, for which the objective of this work is to make known the great diversity of mineralogical specimens. This research is part of the book Guide to excursions to mineralogical localities in Mexico of the PAPIME 101320 project of the Faculty of Engineering UNAM.

The history of this mining district goes back to the colonial period in the 16th century, where silver, lead, zinc, and a little gold were extracted. It passed from hand to hand until it came to belong to the well-known Industrias Peñoles, this district being the one that in the 19th century, it propelled Peñoles into the great mining company it is today. It was exploited on a large scale until the beginning of the 20th century, it has more than 100 km of mining works and a depth of up to 800 meters.

The "La Ojuela" mine corresponds to a Carbonates and Replacement Deposits CRD type deposit that consists of mantles and chimneys rich in sulfides encased in carbonate rocks. It is in the physiographic province of Cuencas y Sierras, which consists of both narrow and wide mountain ranges limited by wide valleys resulting from erosion.

The geology of the deposit corresponds to a sequence of massive limestone and highly deformed fossiliferous parts of the Cretaceous that correlate with the Fm. Aurora. This carbonate sequence is intruded by numerous intrusives, the most famous being El Sarnoso of granodioritic composition with an age of 35 Ma (García Padilla & Millán Quezada, 2004) outcrops in the center of the Sierra de Mapimí which has a high arsenic content. Evidenced by the presence of disseminated arsenopyrite, there are also andesitic porphyry dikes and a

tourmaline diorite with non-economic mineralization.

The mine has 16 levels (Gibrán, personal communication, July 18, 2022) of which only the first five are accessible and the other 14 are flooded, which has favored its exploration and investigation in order to understand the immense mineralogical variety.

The zone in which this study focuses is in the upper part of the deposit that corresponds to the first levels and are the oxidized areas; where exogenous agents interacted with several of the chimneys, which fostered and enhanced the generation of a great diversity of minerals.

# 1. Generalidades

## 1.1 Objetivos y alcances.

1. El objetivo principal de este trabajo es hacer una descripción de algunos de los especímenes mineralógicos que se han encontrado en la mina "La Ojuela", Mapimí, Durango, describiendo sus características fisicoquímicas y ubicando en que parte del yacimiento se encuentran de los minerales observados en campo y/o prestados por colecciones privadas, para contribuir con el capítulo sobre esta localidad del texto: Guía de excursiones a localidades mineralógicas de México, del proyecto PAPIME PE 101320.
2. Realizar un reconocimiento de las unidades que afloran en las cercanías de la mina "La Ojuela" asimismo una descripción de las obras mineras, todo esto con la finalidad de describir las estructuras mineralizadas, explicar la formación del yacimiento y los minerales que las constituyen.
3. Las descripciones de los minerales se harán de manera macro con muestras de mano y de forma micro con láminas delgada con ayuda de un microscopio petrográfico. Se utilizarán métodos analíticos como la difracción de rayos X, para caracterizar adecuadamente algunos de los minerales obtenidos en el trabajo de campo o de colecciones privadas.

## 1.2 Localización.

La zona de estudio está ubicada en la Sierra de Mapimí. Se encuentra en la región noroeste del país en el estado de Durango, en el municipio de Mapimí. La mina “La Ojuela” está a 11 km al sureste del poblado de Mapimí, Durango y a 45 km al noroeste de Torreón, Coahuila, siendo esta la ciudad más cercana; el acceso al área de trabajo desde dicha ciudad es por la carretera federal número 49D (Torreón, Coahuila – Jiménez, Chihuahua), desviándose en el poblado de Bermejillo por la carretera federal 30 (Bermejillo – El Palmito, Coahuila) en dirección a Mapimí hasta la desviación al puente colgante La Ojuela, en el que se tiene que pagar una aportación para poder ingresar a la zona por medio de una terracería en buenas condiciones (figura 1.2.1).

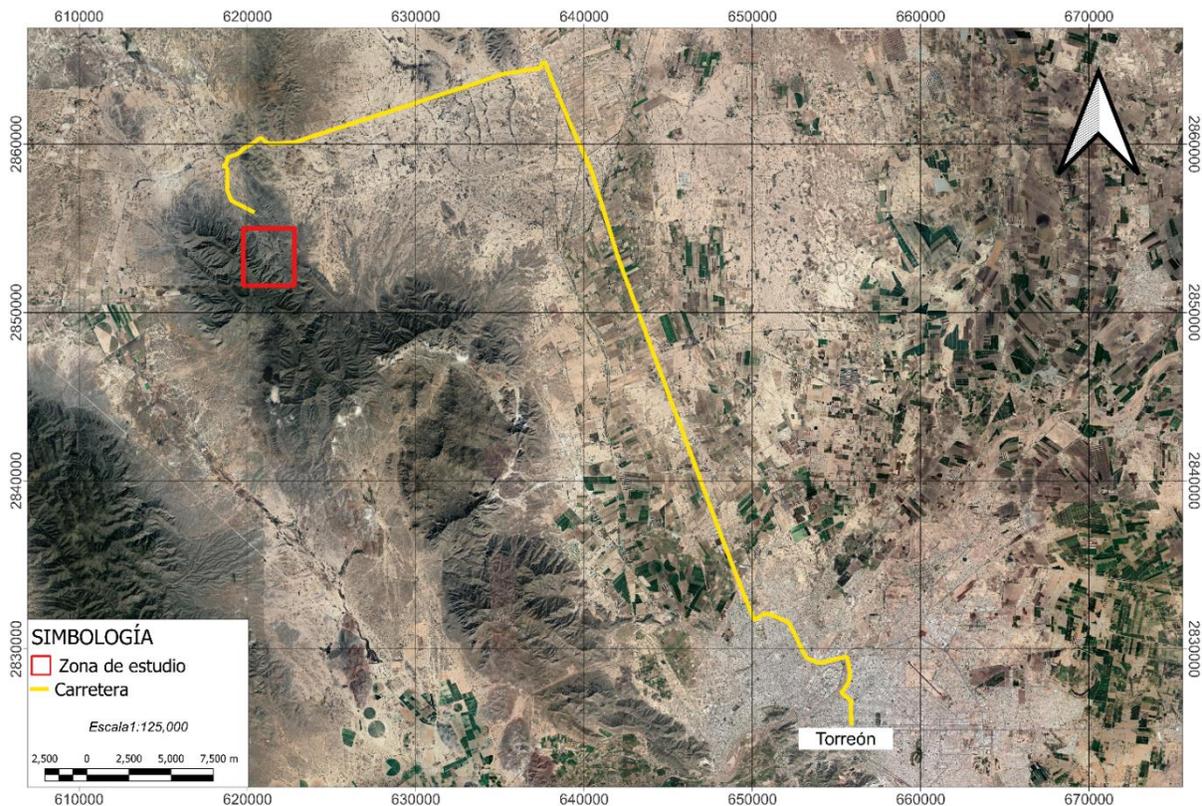


Figura 1.2.1. Acceso desde Torreón al área de interés.

El acceso por la carretera federal 30 es el único acceso disponible al público, cabe destacar que desde mediados del siglo XX nadie habita el pueblo de La Ojuela.

El área de interés se encuentra delimitada por las coordenadas UTM 619750 a 622800 m.E 2851600 a 2855000 m.N, con altitudes muy variables desde 1350 a 2450 msnm. (figura 1.2.2).



Figura 1.2.2. Zona de estudio.

### 1.3 Historia del distrito minero.

El municipio de Mapimí es parte de la llamada Comarca Lagunera, donde se encuentra el distrito minero de La Ojuela de donde obtiene el nombre la mina, siendo una de las zonas mineras más antiguas del estado de Durango y del occidente del país (Hoffman, 1968). El distrito fue descubierto en 1598 por los españoles comandados por Antón Martín Zapata (Universidad Juárez del Estado de Durango, 2016). Por lo que formaron una comunidad ubicada en una de las barrancas cercanas a la mina llamada “La Ojuela” que siempre estuvo ligada a la actividad minera. El nombre se le atribuye a la textura que presenta la galena en las zonas mineralizadas.

El poblado de Mapimí, así como La Ojuela empezó a crecer desde el siglo XVIII hasta principios del siglo XIX, donde llegaron a habitar hasta 8000 personas (Hoffman, 1968) este periodo se caracterizó por un ambiente tranquilo en la colonia, sin embargo en los primeros años de explotación existió una tensa relación entre las tribus originarias de la zona y los españoles, lo que provocó varios ataques, el más sangriento fue en 1715 en la procesión del Jueves Santo en la que murieron 400 habitantes de La Ojuela (López, 2009).

Los españoles eran quien administraban la mina, mientras que los mestizos e indígenas eran los designados para la explotación del mineral en la mina. El modelo extractivo consistía en la explotación de vetas de galena argentífera.

La Independencia de México provocó un abandono parcial de la mina lo que ocasionó derrumbes, inundaciones en los niveles inferiores y pérdida de equipo para el minado. Después de la independencia la mina pasó de manos españolas a mexicanas. En años posteriores el país careció de estabilidad social y económica por diferentes eventos históricos como la intervención estadounidense en 1846 y las intervenciones francesas que culminaron con un Imperio de 1863 a 1867. No obstante, no fue hasta finales del siglo XIX cuando México volvió a tener una relativa estabilidad y se empezó a explotar el distrito minero de La Ojuela.

La Constitución de 1857 concedió a los diferentes estados de México la facultad de legislar la minería, pero los estados de Hidalgo y Durango trabajaron en reglas y códigos en la materia (López, 2009), así como leyes que acontecieron posteriormente como la Ley Minera de 1892 promovieron una explotación más ordenada y a un mayor nivel; donde grandes empresas extranjeras empezarían a tener una mayor inversión, además de verse favorecidas. En el porfiriato no cambió la situación, al contrario, existió un auge donde varios extranjeros principalmente estadounidenses empezaron a comprar tierras en el norte del país por la riqueza mineral de las mismas, a pesar de las temperaturas extremas donde se ubicaban.

Durango a finales del siglo XIX tenía grandes distritos mineros como: Cuencamé, Santiago Papasquiari, Nazas, Tamazula y otro más pequeños, pero no menos importantes como lo son: Mapimí, La Velardeña, El Oro, San Juan de Guadalupe e Indé.

Durango atrajo a varias empresas e inversionistas a sus diferentes distritos mineros. La familia suiza Guggenheim fue la principal inversionista en Cuencamé, además de la compañía estadounidense Grand Guillete que también invirtió en La Velardeña, en el distrito Nazas las principales empresas fueron la mexicana Peñoles S.A. y la estadounidense American Smelting and Refining Company y en el distrito minero de Indé participaron Indé Gold Mining Company y Lustre Mining Company.

Peñoles la compañía mexicana de carácter internacional tuvo su origen en el año 1887 cuando un grupo de empresarios mexicanos reabrieron las minas de San Rafael, Jesús María y Nuestra Señora del Refugio en la Sierra de Peñoles en el municipio de San Pedro del Gallo en Durango a unos 80 km al suroeste de Mapimí; con el objetivo de explotar dichas minas abandonadas y en mal estado. La minera mexicana tuvo un crecimiento significativo, por lo que en 1892 empezaron a explorar la Sierra de La Bufa propiedad de Mapimí Councils Bluffs en conjunto (López, 2009) ubicación donde se encuentra el área de estudio del presente trabajo.

Ambas compañías mineras introdujeron rápidamente electricidad y conectaron con una línea férrea el poblado de Mapimí con Bermejillo, además de instalar una planta para el beneficio de oro y plata principalmente. El distrito minero en poco tiempo se convirtió en uno de los más avanzados del país y para prueba de esto en 1892 se construyó el puente de La Ojuela que servía para conectar las minas de La Ojuela con las del campo sur (López, 2009), el puente colgante tiene una longitud de 318 m de largo por 1.8 m de ancho, superando acantilados de hasta 100 m de altura. Dato curioso, se dice que fue la inspiración para el famoso puente colgante Golden Gate en Estados Unidos.

El distrito minero de La Ojuela llegó a tener varias minas en las que destacan: La Ojuela, Santa Rita, San Vicente, El Socavón, San Juan, La Paz, La Concepción, entre otras, siendo la primera la más importante de todas. El distrito minero tuvo su mayor producción en el año 1899, sin embargo, para 1913 proporcionaba el seis por ciento de la producción mineral en México (Hoffman, 1968), la importancia del distrito fue crucial para el crecimiento de la Compañía Peñoles.

Los problemas sociales que enfrentó México en la revolución, así como una baja de los precios internacionales de los metales empezaron a mermar los dividendos que generaba el distrito minero, para 1921 empezó a disminuir de manera considerable la producción de la mina, por los problemas antes mencionados, así como una extracción menor de sulfuros por la misma explotación de años y una mayor de concentración de silicatos en las rocas haciendo más difícil el beneficio de la mena. Para la década de 1930 la producción cesó por parte de Peñoles, llevándose toda la infraestructura implementada y solo dejando el puente colgante. La explotación continuó de manera muy localizada y de forma artesanal por los pobladores de la zona.

La producción que se atribuye a la época de 1893 a 1931 es de 3,817,562 toneladas con 3.7 g/ton de oro y 432 g/ton de plata y 14.9 % de plomo (Hayward and Triplet, 1931, como se citó en Hoffman, 1968).

## 1.4 Modelo de yacimiento: Reemplazamiento de carbonatos.

Los depósitos minerales correspondientes a reemplazamiento de carbonatos (*Carbonates Replacement Deposits* CRD) se caracterizan por la geometría en la que la mineralización se produce. Consiste en mantos cuando son planos horizontales y en chimeneas cuando se forman cuerpos verticales tabulares Ridley, 2013 en (Espinoza, 2020).

Los depósitos CRD se forman por un sistema magmático-hidrotermal con temperaturas mayores a 250°-500°C, fluidos con 1 a 60 % en peso NaCl eq; donde los fluidos son transportados a través de fallas, fracturas y planos de estratificación (Megaw, Ruiz, & Titley, 1988). Estos depósitos se encuentran generalmente en zonas donde se ubican los arcos continentales de edades del Paleozoico al Cenozoico (Espinoza, 2020).

Los CRD se caracterizan por tener una alta presencia de polimetales que dependen de la composición de los fluidos hidrotermales, a grandes rasgos pueden contener Pb, Zn, Ag, Cu, As, Sb, Mo, Hg, ± Au (Plumlee et al., 1996).

Los yacimientos CRD pueden estar correlacionados en un sistema Pórfido-Skarn-CRD (Sillitoe, 2010) donde los depósitos CRD se encuentran en las partes distales de los skarn e intrusivos (Megaw, Ruiz, & Titley, 1988). Figura 1.4.1.

En ocasiones los CRD son llamados skarn o viceversa, por lo que es muy importante diferenciarlos. Los calcosilicatos son la clave para distinguirlos, en el skarn son una fase mineral indispensable que ayudan a saber en parte del depósito nos encontramos, en los CRD hay una ausencia de estos (Megaw, Ruiz, & Titley, 1988).

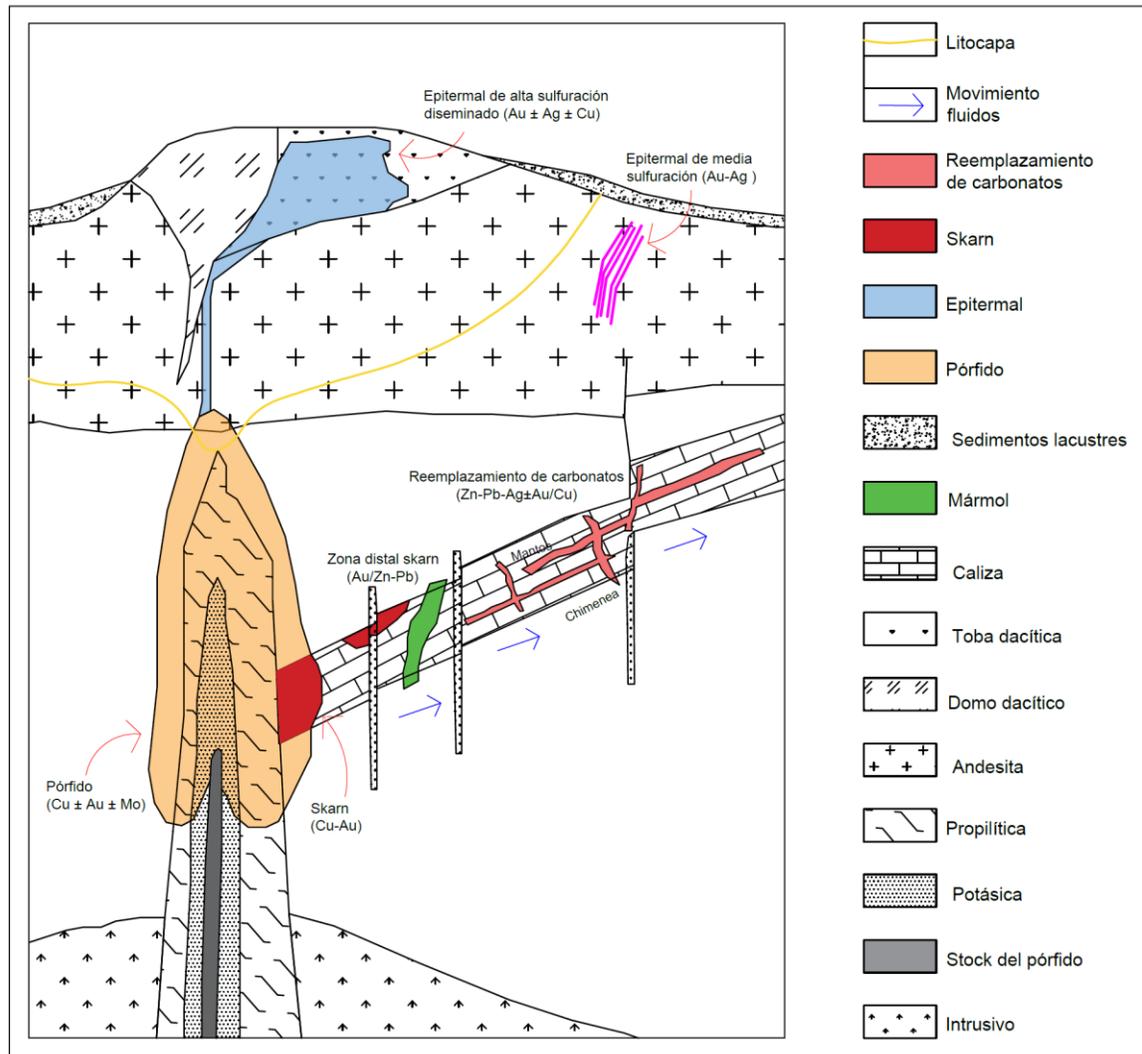


Figura 1.4.1. Modelo de un depósito de reemplazamiento de carbonatos. Modificado de (Sillitoe, 2010), en el que se observa como los CRD son una parte distal de un sistema pórfido-skarn-CRD.

Los CRD se encuentran emplazados en rocas carbonatadas, dolomíticas y en ocasiones en lutitas. Su metalogénesis implica (1) la existencia de uno o varios intrusivos de composición intermedia a félsica (2) circulación de fluidos hidrotermales producto del enfriamiento del cuerpo ígneo (3) mezcla de fluidos hidrotermales con agua meteórica.

Al estar en las partes distales de los skarn, los fluidos que llegan hasta esta zona ya son una combinación de fluidos hidrotermales y agua meteórica donde los minerales precipitados principales son sulfuros.

La paragénesis mineral, apunta que la disminución de la temperatura del fluido por el enfriamiento de la mezcla de fluidos hidrotermales con agua de reciente infiltración y la neutralización de dicha mezcla de fluidos por las rocas encajonantes, son responsables de reducir la solubilidad de los complejos químicos metálicos. Favoreciendo la precipitación de sulfuros y metales preciosos, así como magnetita y hematita (Robb, 2005).

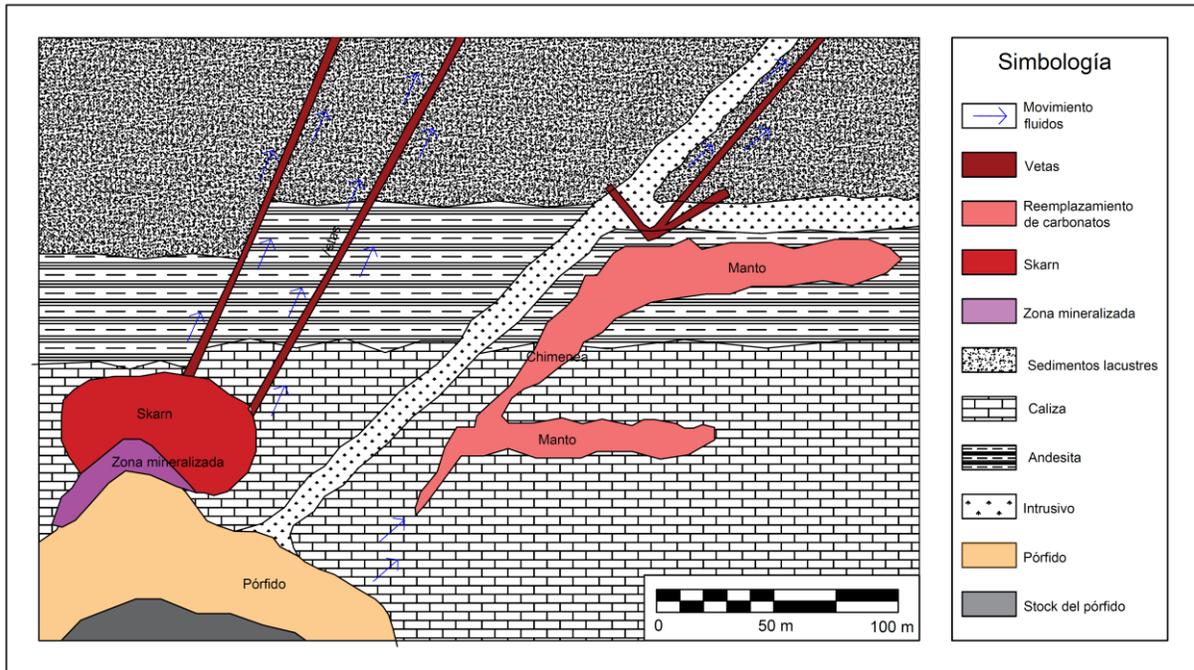


Figura 1.4.2. Esquema de la relación entre un sistema de pórfido-skarn-CRD, donde se propone un acomodo espacial en el subsuelo. Tomado y modificado de (Plumlee et al., 1996).

## Alteraciones

Las alteraciones más comunes son la recristalización de los carbonatos, dolomitización, y mineralización de óxidos de manganeso, así mismo, algunos depósitos presentan una alteración de carbonatos a jasporoide rico en sílice (reemplazamiento de calcedonia en rocas preexistentes) (Plumlee et al., 1996).

La recristalización y marmorización ocurre generalmente cercano al intrusivo y se puede extender hasta 500 m, mientras que cercanos a mantos y/o chimeneas suelen ser muy

pequeños o inexistentes, por lo que es muy común ver el contacto nítido entre la roca encajonante sana y la estructura mineralizada (Megaw, Ruiz, & Titley, 1988).

La alteración cercana al cuerpo intrusivo es argílica producto de una alta concentración del ion  $H^+$  con temperaturas de 100 a 300°C (Comisión Federal de Electricidad, 2016), mientras que en las zonas distales la alteración propilítica definida por la presencia de epidota, clorita, pirita (Plumlee et al., 1996).

En el estudio de (Ray et al., 2001) notaron que la mineralización de las chimeneas y/o mantos están regidas por cuatro condiciones:

- Rocas carbonatadas como encajonantes.
- Contactos litológicos con diques y sills.
- Estratificación paralela continua y fallas.
- Pliegues antiformes

Es un yacimiento que se formó después de las rocas encajonantes, por lo cual la mineralización es epigenética y tiene varias etapas. La mena de este tipo de yacimientos es esfalerita, galena, siderita, marcasita, rodocrosita, calcopirita, tetrahedrita, argentita y minerales de Au-Ag. Mientras que los minerales de ganga son: calcita, cuarzo, pirita, fluorita y barita (Plumlee et al., 1996).

La mineralización secundaria por la meteorización es muy común. La presencia de agua con un muy alto pH se observa en la presencia de smithsonita, hemimorfita, psisomelano, pirsolusita, limonita, jarosita.

Los CDR tienen valores de por lo menos el 50 % de sulfuros y pueden ser depósitos muy pequeños de 10 mil toneladas, hasta de 30-40 millones de toneladas (Plumlee et al., 1996), lo que quiere decir que son yacimientos de altas leyes y bajos tonelajes.

## 1.5 Metodología de trabajo.

Los objetivos presentados en este trabajo se alcanzaron con la metodología de trabajo que consistió en lo siguiente: recopilación de información, trabajo de campo, muestreo, análisis petrográfico, minerográfico, difracción de rayos X, integración y descripción mineralógica del yacimiento.

### 1.5.1 Recopilación de información

En esta etapa se recopiló información geológica del Servicio Geológico Mexicano (SGM), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la iniciativa privada, universidades como la UNAM y The University of Arizona, así como de otros sitios en donde se encontró información relacionada con la zona de estudio, de esta forma se tuvo un marco de referencia y se pudo fijar un plan de trabajo. Toda la información fue integrada en un sistema de información geográfico (SIG), con el cual se generaron mapas y figuras.

### 1.5.2 Trabajo de campo

Se realizó dentro y fuera del área de estudio, para llevarlos a cabo se efectuaron recorridos y puntos de verificación geológica; de esta forma se establecieron las características físicas y mineralógicas de las rocas y sedimentos que constituyen el subsuelo del área. Como resultado se estableció el modelo geológico y se comparó con modelos preexistentes.

### 1.5.3 Muestreo

Durante el trabajo de campo con base en planos y mapas recopilados en la primera etapa, se buscó localizar la mayor cantidad de unidades geológicas descritas en dichos mapas. Con la finalidad de corroborar la geología de la zona y tener muestras de cada una de las diferentes litologías que sirvieron para el análisis petrográfico. Se buscaron los mejores y más accesibles afloramientos por cuestiones de seguridad y tiempo

Para la toma de las muestras se limpió el afloramiento y se tomaron las rocas de la parte más sana de este con ayuda de un cincel y marro para obtener muestras del tamaño de 100 cm<sup>3</sup> aproximadamente.

#### 1.5.4 Análisis petrográfico

Se realizó con la finalidad de determinar la mineralogía de las muestras de mano, de forma directa y apoyado de las propiedades ópticas minerales como lo son: color, pleocroísmo, relieve, extinción y maclado.

Con apoyo del Museo de Geología de la Universidad Autónoma de México, se permitió la descripción de especímenes mineralógicos de la *Colección Geográfica* donada por el mineralogista mexicano Miguel Romero. También se describieron colecciones privadas en las que se encuentra la *Colección Victoria-Morales*.

El análisis petrográfico se realizó con un microscopio minerográfico *ZEISS* modelo *PRIMOTECH* (figura 1.5.4.1) que permite identificar minerales transparentes y opacos, así como sus texturas. Las láminas analizadas en el presente trabajo se realizaron utilizando los dos métodos (luz transmitida y luz reflejada), dependiendo del tipo de muestra.

La petrografía de luz reflejada también conocida como Mineragrafía. Se utiliza para los minerales metálicos y opacos que en muchos de los casos resultan ser la mena. La mineragrafía es similar a la microscopia petrográfica, utiliza el mismo mecanismo de lentes, polarizador y analizador, pero la luz proviene de la parte superior de la muestra contraria a la luz reflejada, lo que permite identificar a los minerales opacos en las superficies pulidas (Castillejo Carreón, 2017).



*Figura 1.5.4.1. Microscópio ZEISS modelo PRIMOTECH utilizado.*

Se utilizó *“Identification tables for minerals in thin sections, E.P. Saggerson”* y *“Atlas de asociaciones minerals en lámina delgada, vol I, II y III, Melgarejo”* para la identificación de minerales traslucidos, así como *“The ore minerals under the microscope an optical guide”* para los minerales opacos.

La preparación de las láminas delgadas y superficies pulidas se realizó con el apoyo económico del PAPIME 101320 en la Ciudad de México, con la finalidad de ser estudiadas en este trabajo y en un futuro formar parte del acervo de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México).

### 1.5.5 Difracción de rayos X

La difracción de rayos X (DRX) se utilizó con el propósito de identificar los minerales que fueron de difícil caracterización en muestra de mano y en microscopio.

La DRX consiste cuando los rayos X monocromáticos pasan por cristales, provocando una reflexión que dependerá de la estructura cristalográfica de la sustancia a analizar. Cada mineral tiene planos y distancias cristalográficas únicas por lo que cada sustancia tendrá una reflexión única. El resultado de la DRX es un patrón de difracción o difractograma que será único por cada muestra analizada equivalente a una huella dactilar a través de la cual puede identificarse uno o varios cristales contenidos en la muestra.

El análisis se realiza sobre polvo fino ( $< 0.75$  mm) que se obtiene al separar y moler la muestra a analizar, se requiere no más de un gramo de muestra. La detección mínima es de alrededor del 1 %; en cantidades menores no pueden ser detectados. Por lo cual solo es aplicable para identificar macroconstituyentes en la muestra.

La identificación de minerales es semicuantitativa y se realiza por comparación de los datos obtenidos del difractograma con los datos teóricos reportados en la Base de Datos Internacional Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS).

Se realizaron tres análisis de DRX que consistieron en separar el mineral lo más puro que se pudiera de la muestra con la ayuda de un cincel y pica, para después moler en un mortero de ágata el polvo obtenido. Se procedió a montar las muestras pulverizadas en el difractómetro automático de polvos SIEMES modelo D5000.



*Figura 1.5.5.1. Difractómetro Automático de Polvos Siemens modelo D5000, el cual se apoya en modernos programas computacionales de búsqueda e identificación de elementos y/o compuestos mediante la Base de Datos Internacional JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).*

A continuación, se enlistan las características del difractómetro utilizado en el Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México:

Equipo: **Difractómetro Siemens modelo D5000** y consta de:

- Generador de rayos X Siemens K 710H, Potencia 3 kW.
- Tubo de rayos X de radiación de Radiación  $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda$ : 1.54 Å.
- Goniómetro vertical Bragg-Bretano automático con detector de centelleo.
- Monocromador secundario de grafito en entrada del detector.
- El intervalo de escaneo:  $4^\circ$  a  $70^\circ 2\theta$ .
- Condiciones del generador: 30kV, 20mA.
- Salida digital de datos.

El software utilizado para la identificación de las fases minerales de las muestras analizadas fue el MATCH 2.

## 2. Marco geológico

### 2.1 Evolución tectónica.

La zona de estudio se encuentra en la provincia fisiográfica de Cuencas y Sierras, se encuentra a menos de 90 km al oeste de la provincia Sierra Madre Occidental (SMO); ambas definidas por Raisz, 1964.

La provincia de Cuencas y Sierras consiste en sierras tanto angostas y anchas limitadas por amplios valles producto de la erosión de estas. La parte norte del Bolsón de Mapimí se caracteriza por el predominio de grandes valles y sierras pequeñas con un lineamiento N-S; en cuanto a la Sierra de Mapimí y aledañas consisten en sierras alargadas y angostas con una alineación NW-SE con valles formados entre estas. Las sierras se encuentran plegadas y cabalgadas, además de contener cuerpos intrusivos emplazados, siendo el de mayor tamaño en la Sierra de Mapimí en el pueblo de Dinamita con una forma semicircular de 8 km (Eguiluz de Antuñano & Campa Uranga, 1982), mientras que en la parte sur de Torreón las sierras son alargadas y anchas con pequeños valles entre estas, con una dirección casi E-W. (Raisz, 1964).

De forma regional los lineamientos coinciden con los bordes de la paleoisla de Coahuila. Existe un sistema de fosas y pilares formados entre el Jurásico Superior – Cretácico Inferior que controlan la sedimentación (García Padilla & Millán Quezada, 2004).

En el Jurásico Superior el área se encontraba inundada por un mar muy somero lo que propició la sedimentación de evaporitas y carbonatos que formaron grandes plataformas las cuales posteriormente fueron drenadas por la disminución del nivel del mar y cubiertas por terrígenos formando la paleoisla de Coahuila (Eguiluz, et al., 2000) en (García Padilla & Millán Quezada, 2004).

En el Albiano medio-superior la paleoisla de Coahuila fue transgredida en su totalidad por el Golfo de México, por lo que la depositación predominante fueron rocas carbonatadas de un

ambiente de plataforma somera y arrecifal, por lo que hay un cambio de facies de plataforma a cuenca. Durante el Cretácico Superior la cuenca se bascula al este, posiblemente por un cambio en el ángulo de subducción de la placa. Las rocas carbonatadas que se depositaron contienen un mayor contenido de arcillas y arenas, además se tienen depósitos de rocas volcánicas félsicas e intermedias en los bordes proveniente de la zona donde actualmente se encuentra la SMO (García Padilla & Millán Quezada, 2004).

De acuerdo con Coney, P. (1983) en (Cruz P. R., et al., 1999) en (García Padilla & Millán Quezada, 2004) la orogenia Laramide acrecionó los arcos submarinos contra los márgenes continentales, en este caso con la paleoisla de Coahuila; la compresión de la orogenia fue producto de la subducción de la placa del Pacífico a la Norteamericana y duró del Cretácico tardío a finales de Eoceno.

Las rocas carbonatadas tienen una mayor ductibilidad que las rocas terrígenas, por lo cual durante la deformación las rocas carbonatadas originaron estructuras como sinclinales y anticlinales, mientras que las rocas arcillosas y evaporíticas favorecieron al cabalgamiento.

En el estudio de (Eguiluz de Antuñano & Campa Uranga, 1982) se tiene evidencia por pozos perforados de PEMEX cercanos a la ciudad de Camargo Chihuahua que se tienen varias repeticiones de sinclinales con cabalgamientos.

Una vez terminada la orogenia Laramide, las rocas que se encontraban en un grado alto de presión se relajaron a lo que se le conoce como un periodo distensivo con el que se formaron fosas y pilares por el reacomodo del basamento, así como una serie de fallas normales de carácter regional. Las fosas fueron rellenadas por sedimentos terrígenos, volcánicos y vulcanosedimentarios (García Padilla & Millán Quezada, 2004).

Los cuerpos intrusivos existentes en la zona tienen una edad de 32 a 25 Ma (Clark, K. 1980 en Cruz P.R. et al., 1999) (García Padilla & Millán Quezada, 2004).

## 2.2 Zona metalogénica.

El área de estudio se encuentra en los límites de la zona metalogénica de *Diseminados, vetas y stockworks de Au-Ag-Cu* y *Mantos, chimeneas y vetas de Zn-Pb-Ag-Cu* (Servicio Geológico Mexicano, 2017); la Ojuela tiene una mayor afinidad con esta última.

El nombre se debe a la morfología que la mineralización (sulfuros masivos y diseminados) presenta; cuando se observa en forma horizontal se les llama mantos, mientras que las formas tubulares verticales son las chimeneas, también existen las formas irregulares emplazadas en fracturas, fallas y planos de estratificación Ridley, 2013 en (Espinoza, 2020).

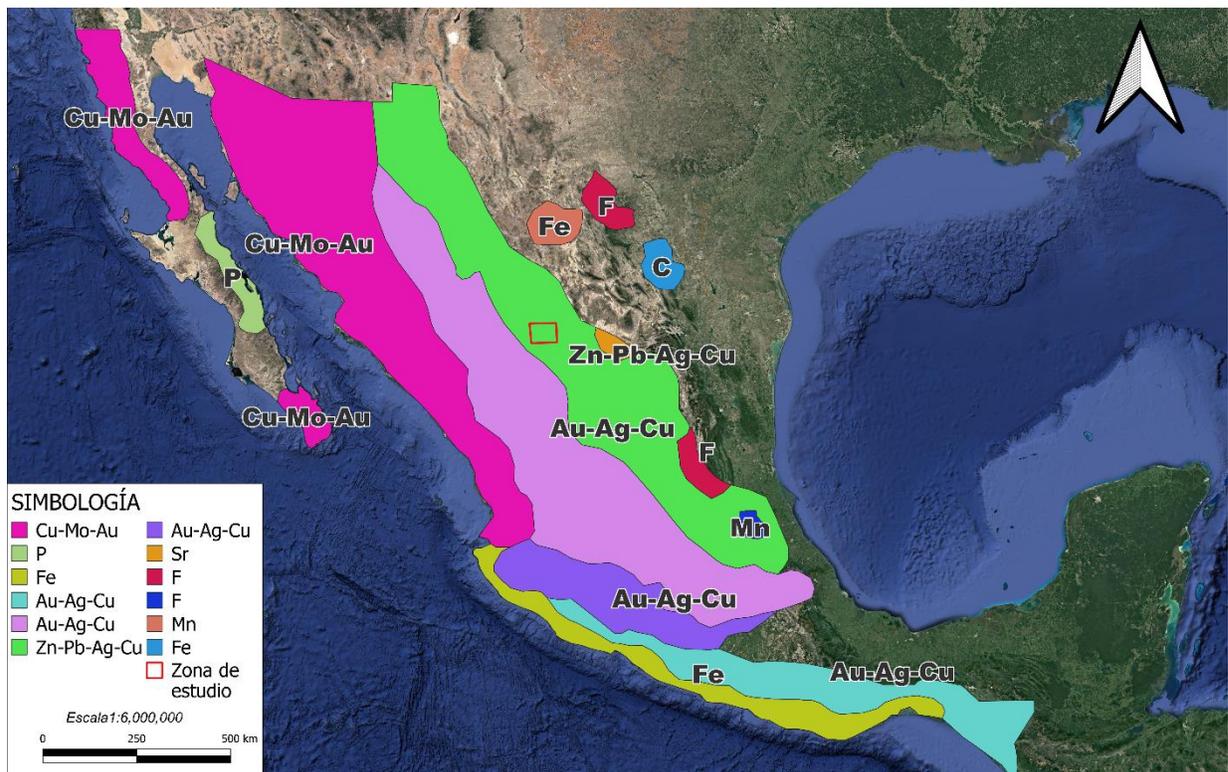


Figura 2.2.1. Mapa metalogénico tomado y modificado del Servicio Geológico Mexicano.

El potencial minero cercano a la zona es poco conocido, siendo la mina “La Platosa” la más cercana y grande con una extracción en 2018 de 718,582 oz de Ag, 4,261,256 lbs de Pb y 6,056,246 lbs de Zn (SRK Consulting (Canada) Inc, 2018).

## 2.3 Estratigrafía.

La zona a nivel regional como se mencionó anteriormente se encuentra en la provincia fisiográfica de Cuencas y Sierras, sin embargo, se encuentra muy cercana al límite de la Sierra Madre Occidental (SMO), por lo que la estratigrafía de la zona es variada tanto en composición como distribución. Las rocas sedimentarias se encuentran ampliamente distribuidas en las sierras, mientras las rocas ígneas son de tipo intrusivo y varían de máficas a félsicas; mientras los valles del Bolsón de Mapimí se encuentran sepultados por sedimentos recientes. Las edades varían desde el Jurásico hasta el Cuaternario.

### 2.3.1 Jurásico

#### **Formación Nazas (TRJ(?)MV)**

Fue definida como una secuencia de rocas volcánicas (andesitas, riolitas) interestratificadas con lutitas, limolitas feldespáticas, areniscas y tobas. La localidad tipo se encuentra en la Estación Nazas del ferrocarril Durango – Coahuila (Pantoja-Alor & Rincon Orta, 1967).

La distribución comprende desde San Pedro El Gallo, Durango en la parte más occidental, en los anticlinorios de Villa de Juárez, Durango y Jimulco, Coahuila, así como en la sierra de San Julián, Candelaria en Zacatecas y en la sierra de Catorce en San Luis Potosí (Infazón, 1986).

Estudios isotópicos de K-Ar obtuvieron una edad de  $183 \pm 8$  m.a., que corresponde a una edad Jurásico Medio. La petrografía indica una secuencia de sedimentos continentales asociada a un arco volcánico calcoalcalina (Infazón, 1986). Subyace a las formaciones La Gloria y Zuloaga.

### **Formación Zuloaga (JokCz)**

Conformada por calizas con estratificación gruesa, capas de 90 cm a 3 m de color gris a gris claro con nódulos de pedernal en la parte superior (Imlay, Studies of the Mexican Geosyncline, 1938), con presencia de bivalvos y corales pobremente conservados, texturalmente Salvador (1991) en (López Palomino, Formación: Zuloaga, 2013) la define como packstone con granos en su mayoría no esqueletales. El espesor de la Formación Zuloaga es de 700 m.

La distribución comprende el norte de Zacatecas y San Luis Potosí, asimismo el sur de Coahuila aflora en los anticlinales de la Sierra Madre Oriental. En el estado de Coahuila aflora en el anticlinal de la Viesca y Padrerones, en la Sierra Presitas y la Sierra San Francisco.

Pertenece al Jurásico Superior, específicamente al Kimmerigiano, la sedimentación se asocia a la apertura del Golfo de México a un ambiente de agua somera tropical con muy poco o escaso aporte de terrígenos. Se correlaciona lateralmente con la Fm La Gloria y subyace a la Fm. La Casita

### **Formación La Gloria (JokAr-Cz)**

Fue definida por (Imlay, 1936) en la que describe 9 unidades litológicas, que son una secuencia de areniscas de color amarillo a gris con caliza que en la base contiene nódulos de pedernal. La localidad tipo se encuentra en el Cañón del Mimbres, Coahuila.

La distribución se encuentra en la sierra Parras, Cañón del Mimbres, en la parte superior del anticlinal Taraises y La Prieta todos en Coahuila, en el anticlinal La Casita, sierra Garambullo y sierra San Ángel al sur de Chihuahua, mientras que en la parte noreste del estado de Durango en San Pedro del Gallo y Villa de Juárez.

La unidad tiene espesor variable, (Goldhammer & Johnson, 2001) en (López Palomino, 2015) propone un espesor promedio de 50 a 100 m, sin embargo, en el suroeste del Bloque Coahuila puede alcanzar un espesor de hasta 700 m, (600 m en San Pedro del Gallo y 700 m en Villa de Juárez).

Corresponde al Jurásico Superior, estudios paleontológicos determinan una edad que pertenece al Oxfordiano. El ambiente de sedimentación es facies de offshore, contiene sedimentos clásticos cercanos a la costa y sedimentos de carbonatados de aguas someras (Imlay, 1936) en (López Palomino, 2015). Se correlaciona lateralmente con la Fm Zuloaga y subyace a la Fm. La Casita.

#### **Formación La Casita (JokCz-Y-Lu)**

Definida por (Imlay, 1936) como una caliza gris alternada con lutita carbonatada delgada a gruesa, lutita gris oscuro, arenisca de cuarzo de grano grueso, caliza yesífera con nódulos de limo ferruginoso y lutita amarilla a rosa con un horizonte de amonitas, en la parte norte de Zacatecas y Durango.

La distribución se encuentra en el centro oriente de Chihuahua, al norte de Durango, al sur de Coahuila, en la Sierra Madre Oriental en Nuevo León y parte suroeste de Tamaulipas; los mejores afloramientos se encuentran en el Cañon La Casita, Cañon Traisares y San Pedro del Gallo.

El espesor es variable dependiendo la ubicación, el espesor máximo medido fue por (PEMEX, 1988) en (Díaz Salgado, Formación: La Casita, 2005) con 1300 m aproximadamente; en el área de San Pedro del Gallo el espesor es de 32 a 350 m y en la región de Coahuila a Tamaulipas de 50 a 422 m, (Imlay, 1936) en (Díaz Salgado, Formación: La Casita, 2005). Lo que da un promedio de 400 m.

Corresponde al Jurásico Superior específicamente al Kimmerigiano a Titoniano, incluso se le asigna como límite del Jurásico con el Cretácico (Cantú Chapa, 1999) en (Díaz Salgado, Formación: La Casita, 2005) La sedimentación corresponde a un ambiente lagunar, con condiciones de agua salobres, lo que significa que la laguna estuvo en contacto con el mar en zonas puntuales. Se correlaciona con la Fm. La Caja y Fm. Malone, subyace la Fm. Taraises.

### 2.3.2 Cretácico

#### **Formación Taraises (KbehCz-Lu)**

Fue definida por (Imlay, 1936) dividida por dos miembros, el inferior como calizas grises compactas, mientras que el superior como estratos delgados de calizas grises y calizas arcillosas con alta presencia de fósiles, definidas como wackstone a mudstone.

Tiene una gran distribución en la Cuenca Mesozoica del Centro de México (PEMEX, 1988) en (Monier Castillo, Formación: Taraises, 2012) en el actual estado de Nuevo León, Coahuila, San Luis Potosí y Zacatecas. Los principales afloramientos son el Cañón Taraises, Cañón Cortinas, los anticlinales de la Sierra Pájaros Azules, en el poblado de Galeana, Sierra La Silla y Sierra Cruillas.

El espesor es variable, (Imlay, 1936) propuso un espesor de 145 m, sin embargo, (PEMEX, 1988) reporta espesores de 25 m a 210 m ambos en (Monier Castillo, Formación: Taraises, 2012), el espesor más cercano a la zona que compete esta tesis es de 200 m en el pueblo de San Pedro del Gallo.

Corresponde al Cretácico Inferior (Valenginiano – Hauteriviano). El ambiente definido por (Imlay, 1938) son facies de zona batial. Estudios más recientes definen el ambiente como una cuenca profunda y de ambiente reductor con depositación singenética de pirita (Santiago-Carrasco et al. 2000) en (Monier Castillo, Formación: Taraises, 2012) Subyace a la Fm. Cupido.

### **Formación Cupido (KhapCz)**

Fue definida por (Imlay, 1937) que consta de calizas de color gris oscuro, forma capas con concreciones de pirita, y concreciones de pedernal gris claro, (PEMEX, 1988) la divide en tres facies: lagunar conformado por lodo calcáreo; pre-arrecifal compuesto por wackstone y packstone, mientras que la facie arrecifal está formado por boundstone de corales y rudistas.

Tiene una distribución muy amplia en el noreste del país, así como en la Sierra Madre Oriental. En el estado de Coahuila tiene una amplia extensión rodeando el borde de la paleo isla del mismo nombre. En Durango se presenta en la Sierra de San Pedro del Gallo, en la Sierra de San Julián y a lo largo del río Nazas.

Los espesores máximos se encuentran en la Sierra Parras de 789 a 1000 m (Humphrey & Díaz, 2003) en (Monier & López Palomino, 2011), siendo el Cañón del Mimbres la localidad tipo. Hacia el suroeste de la isla de Coahuila el espesor disminuye siendo su mínimo de 5 m en el límite de los estados de Chihuahua y Coahuila.

Las últimas relaciones estratigráficas definen que la Formación Cupido corresponde a una edad del Cretácico Inferior del Hauteriviano – Aptiano (Ángeles Villeda et al., 2005) en (Monier & López Palomino, 2011). El ambiente sedimentario varía, la parte inferior corresponde a aguas poco profundas cálidas de plataforma somera de barrera, mientras que la parte superior se les asigna a aguas profundas. Sobreyace a la Fm. Taraises y subyace a la Fm. La Peña.

### **Formación La Peña (KapCz-Lu)**

Fue definida por (Imlay, 1936) la divide en dos miembros, el inferior son caliza gris oscuro con estratificación media a gruesa y presencia de lutita con un espesor de 420 m, mientras el miembro superior conformado por calizas de estratificación delgada con intercalación de lutitas con vetillas y lentes de pedernal.

Tiene una distribución extensa que abarca toda la Sierra Madre Oriental, la Cuenca de Tamaulipas y el centro-noroeste de la Mesa Central de México (Labarthe Hernández et al., 1982) en (López Doncel, 2005). La localidad tipo se encuentra en la Sierra Parras en el Cañón del Mimbres.

El espesor máximo se encuentra en la localidad tipo y es de 450 m, los afloramientos generalmente tienen espesores delgados de 15 a 40 m. La Fm. La Peña es rica en contenido biológico y un excelente indicador paleontológico, siendo el fósil estrella las amonites.

Corresponde al Cretácico Inferior de edad del Aptiano y se correlaciona lateralmente con la Formación Otates en la parte oriente y hacia el sur con la Formación Guaxcamá. El ambiente sedimentario corresponde a aguas profundas de una zona batial con influencia de sedimentos continentales. Sobreyace a la Fm. Cupido y subyace a la Fm. Aurora.

### **Formación Aurora (KaCz)**

Fue definida por (Burrows, 1910) y caracteriza a un grupo de calizas con diferente contenido de arcilla, nódulos de fierro y pedernal de edad Albiano, sin embargo, (PEMEX, 1988) en en (Basáñez L & Amezcua, Formación: Aurora, 2004) la define como estratos masivos de wackstone-packstone.

La distribución se encuentra en el centro de la Cuenca de Chihuahua y en los límites de Coahuila con Zacatecas en los poblados de Concepción del Oro; siendo la localidad tipo en las cercanías de la mina Aurora en la Sierra Cuchillo Parado.

Se estima un espesor máximo de 1500 m hacia el área de Miquihuana, los mayores espesores se encuentran en el norte-noreste del país, adelgazándose a 40 m en los límites de Coahuila y Zacatecas.

Corresponde al límite entre el Cretácico Inferior y Superior de edad Albiano, por su descripción muy general hecha por (Burrows, 1910) en (Basáñez L & Amezcua, Formación: Aurora, 2004) se puede correlacionar con varias unidades, las principales son: Fm. Glen Rose y el Grupo Fredericksburg ambas del centro de Texas, además con Fm. Tamaulipas Superior. Sobreyace a la Fm. La Peña y subyace a la Fm. Cuesta del Cura.

### **Formación Cuesta del Cura (KaceCz)**

Fue definida por (Imlay, 1936) formada por caliza de estratificación delgada ondulada con intercalaciones de lutita gris y negra de estratificación de media a delgada; en ocasiones se presentan nódulos de pedernal en ambas litologías.

La distribución es amplia en el norte – noreste del país. En Durango se observan afloramientos al noreste colindando con Chihuahua y Coahuila. La Sierra Parras es la localidad tipo de la formación, además existen afloramientos en Nuevo León, San Luis, Tamaulipas y Zacatecas (Martínez Bravo & López Palomino, 2010).

El espesor promedio es de 70 m variando a 64 m en el Cañón Taraises y máximos de 400 m (Martínez Bravo & López Palomino, 2010).

Es del Cretácico Superior de edad Albiano-Cenemoniano, se correlaciona con la parte superior de la Fm. Tamaulipas Superior y con la Fm. Georgetown de Texas. El ambiente depósito se considera de aguas profundas de aguas tranquilas con un constante aporte de sedimentos finos. Sobreyace de forma concordante a la Fm. Aurora, y subyace de forma concordante a la Fm. Indidura.

### **Formación Indidura (KcessCz-Lu)**

Fue definida por (Imlay, 1936) dividida en cinco miembros:

- Parte inferior de la Fm. Indidura que cubre a la Fm. Aurora conformada por capas de yeso.
- Lutita muy deleznable.
- Alternancia de lutita con areniscas.
- Lutita en su mayoría con presencia de algunos estratos de caliza de color negro.
- Caliza con contenido de arcilla de estratificación delgada.

La distribución se concentra en los estados de Coahuila en las cercanías de la Sierra Parras, en Sierra Las Burras y en los valles que forman los sinclinales y anticlinales. En Durango en la Sierra de Mapimí, Sierra San Lorenzo y Sierra Rosario, además de la Sierra de Catorce en San Luis Potosí. No tiene una localidad tipo, sin embargo, el nombre de la formación es tomado del Cerro Indidura en Coahuila.

El espesor máximo propuesto por (PEMEX, 1988) en (Martínez Bravo & López Palomino, 2010) es de 2500 m, sin embargo el espesor máximo medido por (Imlay, 1936) también en (Basáñez L, Amezcua, & Díaz Salgado, Formación: Indidura, 2006) es de 652 m en la Sierra de Parras con espesores mínimos de 13 m.

Pertenece al Cretácico Superior específicamente de edad Cenomaniano-Turoniano, siendo la base del Cenomaniano y la cima del Turoniano; se correlaciona con la Fm. Soyatal y Fm. Agua Nueva, además de Fm. Eagle Ford en Texas, El ambiente de sedimentación es variable, desde aguas profundas a litorales, siendo una depositacion de carbonato de calcio con un gran aporte de terrígenos de tamaño de arcilla y limos. Subyace a la Fm. Caracol y sobreyace a la Fm-Cuesta del Cura.

### **Formación Caracol (KcrossAr-Lu)**

Fue definida por (Imlay, 1937) formada por una alternancia de arenisca de grano medio a fino de matriz calcárea de color pardo con lutita de color gris, con estratificación variable de mediana a delgada

La distribución se concentra en el norte de la Sierra Madre Oriental en los estados de Coahuila en la Sierra Garambullo y en el este y centro de la Mesa Central, que conforma la Sierra de Alcabuz en Durango y Sierra del Gabán en Zacatecas. Siendo la localidad tipo el Arroyo Caracol en Coahuila (Díaz Salgado et al., 2006).

El espesor máximo se observa en Mapimí con 1500 m, sin embargo, el espesor puede ser una repetición de los mismos estratos por plegamiento; en Concepción del Oro en Zacatecas se tiene un espesor de 800 m, mientras que estudios de (PEMEX, 1988) proponen espesores de 200 a 1000 m en (Díaz Salgado et al., 2006).

Corresponde al Cretácico Superior de edad Senoniano específicamente del Coniaciano, se correlaciona con la Fm. San Felipe y la parte inferior de la Fm. Austin Chain en Texas. El ambiente sedimentario se relaciona con aguas someras de antefosa con un alto aporte de terrígenos. Sobreyace a la Fm. Indidura y subyace de manera lateral a la Fm. Lutita Parras.

### **Lutita Parras (KcrossLu)**

Fue definida por (Imlay, 1936) conformada por un paquete potente de lutita negra con estratificación delgada formada por laminación, intemperizan en un color pardo amarillento.

La distribución se concentra en el estado de Coahuila concretamente en la Sierra Parras, de donde toma nombre y es la localidad tipo, existen pequeños afloramientos en Nuevo León y al norte de Zacatecas (Monier Castillo, 2013).

Corresponde al Cretácico Superior de edad Senoniano específicamente del Santoniano. El ambiente sedimentario se relaciona a una cuenca sedimentaria con un alto aporte de terrígenos.

### 2.3.3 Cenozoico

#### **Formación Ahuichila (TeoCgp)**

Definido por (Rogers et al., 1961) formada por un conglomerado por fragmentos angulosos y subredondeados de arenisca color café, lutita gris, pedernal negro y caliza gris, con una matriz arcillo-arenosa con cementante de arcilla calcárea, y en algunas zonas contiene toba riolítica y fragmentos de rocas ígneas.

La distribución se concentra principalmente en los valles de la provincia fisiográfica de cuencas y sierras, conformados por sinclinales y anticlinales; como es el caso del noreste de Mapimí, en Rodeo y Alamillo de Galeana Durango, en el Cerro de Los Gatos y Viesca en Coahuila y al norte de Zacatecas, siendo la localidad tipo en el Frontón de Ahuichila en Coahuila (Díaz Salgado, 2006).

El espesor máximo es de hasta 2000 m en San Pedro del Gallo en Durango, mientras que en el Frontón de Ahuichila es de 305 m (Pérez Rul, 1967) en (Díaz Salgado, 2006).

Pertenece al Terciario de edad Eoceno, se correlaciona con el Grupo Balsas en el sur de México. El ambiente sedimentario es lacustre con un alto aporte de terrígenos producto de la Orogenia Laramide. Sobreycae de una forma discordante angular a la Fm. Cuesta del Cura y subyace en algunas partes de la Fm. Santa Inés, sin embargo, en su mayoría está cubierta por aluvial.

### **Diorita (ToD)**

Kellum (1936) en (Castro Moreno, 1982) en (García Padilla & Millán Quezada, 2004) menciona la existencia de un cuerpo intrusivo de composición diorítica en la parte noreste de la Sierra de Mapimí. Describe la roca como una diorita de color gris verdoso con textura fanerítica con minerales de horblenda, magnetita, flouropatita y hematita.

El cuerpo intrusivo aflora con un espesor de 40 m, está intrusionando a la Formación Aurora e Indidura; y es cubierto en su mayoría por coluvión. Contiene mineralización de polimetálicos y en pequeña proporción oro.

Fue fechado por (Cruz Pérez et al., 2000) en (García Padilla & Millán Quezada, 2004) obteniendo una edad de 32 millones de años, por lo cual, pertenece al Oligoceno y es asociado estratigráficamente al intrusivo El Sarnoso que aflora en la parte sur de la Sierra de Mapimí. Ambos intrusivos están asociados a una regresión del arco magmático hacia el occidente (Ma Clark K. et al, 1980) en (García Padilla & Millán Quezada, 2004):

### **Pórfido andesítico – pórfido dacítico (ToPA-PDa)**

Kellum (1936) en (Castro Moreno, 1982) en (García Padilla & Millán Quezada, 2004) describe un pórfido en la parte central y norte de la actual carta 1:50,000 de Mapimí, en las cercanías del cerro El Toboso y Cerro Prieto. El Servicio Geológico Mexicano en (García Padilla & Millán Quezada, 2004) lo describe como un pórfido andesítico, con una textura porfídica-afanítica constituida por horblenda, augita biotita, magnetita y flouropatita.

El cuerpo intrusivo corta las formaciones Aurora, Indidura y Caracol, se presenta a rumbo de los estratos, reemplazándolos, con una longitud de 200 m a 2-5 km y un espesor de 1 a 20 m, así como pequeñas apófisis.

Pertenece al Oligoceno y se asocia a los pulsos finales del intrusivo diorítico, proporcionó la mineralización de polimetales en el cerro El Toboso y Cerro Prieto.

### **Pórfido riolítico (ToPr)**

Definido por (García Padilla & Millán Quezada, 2004), se ubica en la parte central y norte de los cerros de El Toboso y Cerro Prieto, además de la Sierra El Bermejillo. Consiste en un pórfido riolítico de color rojizo claro, con una textura afanítica con presencia de feldespatos, cuarzo, biotita y minerales secundarios como hematita, cuarzo y arcillas.

Intrusiona las formaciones Aurora e Indidura, además del pórfido andesítico antes descrito, se observa en forma de pseudo estratos a rumbo y en crestones. Tiene una extensión de 300 m a 2.5 km y un espesor de 5 a 50 m

Con una edad de 32 a 25 Ma, pertenece al Oligoceno, asociado a las etapas de tardías de pulsación de los cuerpos intrusivos en la zona norte de México.

## 2.3.4 Cuaternario

### **Coluvión**

Sedimentos constituidos por gravas de las formaciones aflorantes, desde subangulosos a subredondeados, que en ocasiones están pobremente cementados por caliche o arcilla; se ubican en su mayoría en los pies de monte.

### **Aluvión**

Sedimentos ubicados en los valles, sin consolidación alguna conformado por arenas, limos y arcillas, su espesor es muy variable, desde ser una capa casi inexistente hasta cientos de metros. Conforman los valles del Bolsón de Mapimí.

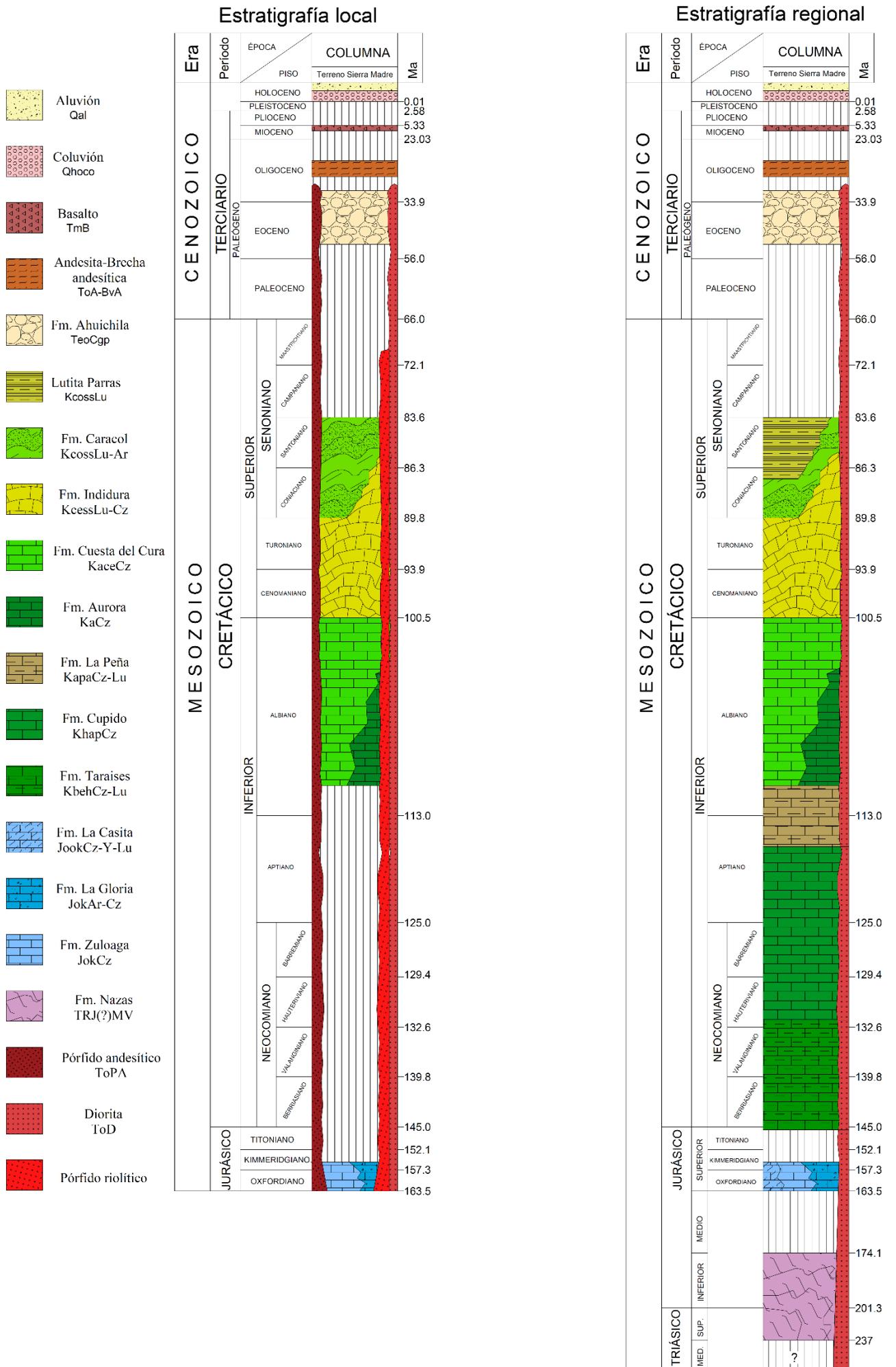


Figura 2.3.1. Columna estratigráfica regional tomado y modificado del Servicio Geológico Mexicano "Carta Mapimi" y columna estratigráfica local propuesta.

## 3. Geología local

### 3.1 Estratigrafía.

En la zona de estudio se tienen diferentes tipos de rocas y su distribución, predominan las rocas sedimentarias, comparando la geología regional aquí no se observa la litología de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental. Las unidades que se encuentran en las serranías son de origen sedimentario y existen pequeños afloramientos de intrusivos tanto en la zona de Cerro Prieto y la Sierra de Bermejillo, además de un gran intrusivo en la parte central de la Sierra de Mapimí.

#### 3.1.1 Jurásico

##### **Formación Zuloaga (JokCz)**

La unidad está compuesta por calizas de estratificación gruesa, de color gris claro en su mayoría, sin embargo, se observan estratos de gris oscuro, contiene nódulos de pedernal, con muy poca presencia de organismos muy poco conservados. La parte superior son calizas masivas con textura tipo packstone, se observaron estilolitas y presencia de dolomitas cercana a las fallas reportadas (NW-SE) y zonas de debilidad, mientras la parte inferior se encuentran estratos gruesos con pequeñas cantidades de arcillas, que al intemperizarse se observan de un color grisáceo pardo claro.

Los afloramientos se concentran en el margen poniente de la Sierra de Mapimí, tienen una extensión de no mayor a 100 m (Hoffman, 1968) en el anticlinal El Toro, están cubiertas hacia el valle por aluvión y por el Fm. Ahuichila, mientras que hacia la zona alta por la Formación La Gloria.



*Foto 3.1.1.1. Fracturas rellenas en la Fm. Zuloaga.*

### **Formación La Gloria (JoAr-Cz)**

Esta unidad se conforma por una intercalación de arenisca y caliza. Hacia la base del afloramiento se observa una arenisca de color pardo rosáceo al fresco que intemperiza a un tono rojizo, con una textura de grano fino formada en su mayoría por cuarzo, los estratos son delgados, sin embargo, varían de 30 cm a 1 m de espesor.

Para la parte superior se observa una caliza tipo wackstone recristalizada y con un alto vetilleo relleno de calcita, además de nódulos de pedernal negro. El espesor de los estratos es delgado a medio. (García Padilla & Millán Quezada, 2004).

Los afloramientos se observan solo en el margen poniente de la Sierra de Mapimí, con una extensión no mayor a 500 m (Hoffman, 1968) en el anticlinal El Toro, éstas cubiertas hacia el valle por aluvión y por la Fm. Ahuichila, mientras que hacia la zona alta por la Formación Aurora.

### **Formación Aurora (KaCz)**

Esta unidad se conforma por una caliza color gris con presencia de foraminíferos bentónicos, consta de intercalaciones de caliza tipo mudstone y wackstone, con estratos de espesor variable desde 0.5 cm a 2 m. con una estratificación N30°W 25°NE. La roca tiene tres familias de discontinuidades, las cuales en su mayoría están rellenas de calcita, sin embargo, las fracturas cercanas a la veta contienen óxidos de hierro y manganeso, asimismo en menor proporción algunas se encuentran silicificadas.

Se tiene dolomitas de color gris claro intercaladas con estratos de calizas, tienden a tener un mayor fracturamiento al ser menos dúctiles y más densas. En el estudio realizado por (MacLeroy, Franquesa, & Romero, 1977) obtuvieron el contenido de carbonato de calcio y magnesio para ambas rocas en laboratorio; siendo 94.3 CaCO<sub>3</sub> y 2.8 MgCO<sub>3</sub> para la caliza, así como 58.8 CaCO<sub>3</sub> siendo 37.7 MgCO<sub>3</sub> para la dolomita.

La Sierra de Mapimí en su mayoría está conformada por la Formación Aurora, al ser una secuencia de sinclinales y anticlinales, por lo cual definir un espesor en la zona es muy difícil, el espesor más aproximado es de 1100 m (García Padilla & Millán Quezada, 2004).

La Formación Aurora es la roca encajonante de la mineralización del distrito minero La Ojuela, contiene valores de polimetálicos, plata y oro. Los valores más altos de mena se encuentran cercanos a estratos dolomíticos.

Se describieron las muestras JM-15 y JM-19 en el microscopio minerográfico; las cuales se encuentran en el subcapítulo 4.1 “*Petrografía y minerografía*”.



*Foto 3.1.2.1. (1) Vista del plegamiento de estratos gruesos de la Fm. Aurora. (2) Foto de estratos medios y delgados con oxidación. Vista lateral del puente La Ojuela.*

### **Formación Cuesta del Cura (KaceCz)**

La unidad se compone por caliza gris con intercalaciones de limolita y lutita. La caliza tiene una textura tipo wackstone con una estratificación media a gruesa, tiene presencia de bandas de pedernal negro de 10 cm, además de estar fracturada, sin embargo, están rellenas de arcillas y/o calcita.

Los afloramientos son muy puntuales en la margen nororiente de la Sierra de Mapimí (Hoffman, 1968).



*Foto 3.1.2.2. Afloramiento de la Fm. Cuesta del Cura con una banda de pedernal.*

### **Formación Indidura (KcessCz-Lu)**

La unidad está compuesta por una secuencia de lutita con caliza. La lutita es de color pardo al fresco y rojiza intemperizada con laminación delgada, mientras que la caliza tiene un alto contenido de arcilla y es de color anaranjada claro de tipo wackstone con una estratificación delgada de 8 cm a 25 cm.

En muestra de mano no se distingue mineralización, sin embargo, en microscopio se observan algunos minerales opacos no identificables por el tipo de preparación de la lámina delgada JM-25 que se encuentra en el subcapítulo 4.1 “*Petrografía y minerografía*”.

Los afloramientos se encuentran en toda la margen nororiental-oriental de la Sierra de Mapimí, delimitada por las cabalgaduras El Muerto y San Carlos, lo que genera un contacto entre la Formación Aurora hacia las partes elevadas, mientras que para el valle está cubierta por aluvión.

El espesor de la formación no se ha determinado por el intenso plegamiento de la zona, (MacLeroy et al., 1977), no obstante el espesor medido en Mapimí ha sido de 155 m.



*Foto 3.1.2.3. Afloramiento de la Fm. Indidura.*

### **Formación Caracol (KcossAr-Lu)**

La unidad está conformada por una intercalación de arenisca calcárea y limolita. La arenisca es de color gris oscuro al fresco mientras que es de color pardo oscuro a la intemperie, de grano fino a muy fino, mientras que la lutita es de color gris claro al fresco e intemperizada de color rojizo, conformados por una laminación delgada dentro de estratos de espesores de 10 a 30 cm.

En la zona del cerro El Toboso las limolitas presentan un alto grado de silificación, epidotización, cercano a los cuerpos intrusivos presenta metamorfismo de contacto, transformándola a hornfels. Las alteraciones se observan en lámina delgada JM-32 y JM-33 que se encuentra en el subcapítulo 4.1 *“Petrografía y minerografía”*.

Los afloramientos se encuentran en la zona noreste de la Sierra de Mapimí, (Hoffman, 1968) hacia el cerro El Toboso está en contacto con cuerpos intrusivos, hacia la Sierra Mapimí se encuentra en contacto con la Formación Indidura, hacia el valle está cubierta por aluvión.



*Foto 3.1.2.4. Afloramiento de la Fm. Caracol con estratos delgados de arenisca intercalados con lutita.*

### 3.1.3 Cenozoico

#### **Formación Ahuichila (TeoCgp)**

La unidad consiste en un conglomerado polimítico, constituido por litologías preexistentes como son lutitas, calizas y arenisca, los clastos están subredondeados, están consolidados y afloran en la parte poniente de la Sierra Mapimí, con una extensión no mayor a los 500 m, están en contacto discordante con las formaciones Zuloaga, La Gloria y Aurora.

No se observaron fracturas ni fallas en la Fm. Ahuichila, por lo que se propone que su depositación fue posterior a los eventos de deformación.



*Foto 3.1.3.1. Afloramiento de la Fm. Ahuichila con clastos de arenisca, caliza y lutita.*

#### **Granodiorita (ToGrd)**

Consiste en un intrusivo de composición media de un color blanco-verdoso con una textura fanerítica, con una composición de minerales esenciales de plagioclasa (oligoclasa.andesina), horblenda, mientras que los minerales secundarios son el cuarzo, fluorapatita, magnetita, clinocloro y hematita. (Muestra JM-04 ubicada en el anexo “*Descripciones de láminas delgadas*”).

Contiene un alto contenido de pirita y un poco de arsenopirita diseminados en su estructura, se observan grandes xenolitos de color negro que corresponden a una diorita. Los xenolitos son de varios tamaños desde 5 cm hasta 1 m de diámetro, se encuentran en toda la

granodiorita. Compuestos de plagioclasa y hornblenda que en su mayoría esta epidotizada, los minerales secundarios corresponden al 10 %, son minerales opacos no identificables en lámina delgada, cuarzo y biotita (Muestra JM-10 ubicada en el subcapítulo 4.1 “*Petrografía y minerografía*”).

El cuerpo intrusivo aflora en la parte central de la Sierra de Mapimí, intrusionando la Formación Aurora. Tiene una forma semicircular de casi 2 km de diámetro.



*Foto 3.1.3.2. Afloramiento del intrusivo El Sarnoso, donde se observan los xenolitos de color negro.*

### **Pórfido andesítico – pórfido dacítico (ToPA-PDa)**

El intrusivo está conformado por un pórfido andesítico y dacítico tabular, producto de pulsaciones tardías del cuerpo diorítico. El tamaño del afloramiento es de aproximadamente 90 cm de ancho y 50 cm de alto, tiene un color verde pardo de una textura porfídica, compuesto por plagioclasa y hornblenda, mientras que los minerales secundarios son: clinocloro, hematita, montmorillonita y calcita. esta última rellena las cavidades del intrusivo producto de la cloritización,

Se encuentra cloritizado por lo que la plagioclasa casi está en su totalidad cloritizada, muchas cavidades fueron rellenas por calcita que es rodeada por clorita (Muestra JM-12 ubicada en el subcapítulo 4.1 “*Petrografía y minerografía*”).

El intrusivo corta las formaciones Aurora e Indidura, metaformizando las lutitas de la Indidura a hornfels, todo esto en la parte noreste de la Sierra de Mapimí y en el cerro El Toboso y Caracol, se presenta a rumbo de los estratos, reemplazándolos, con una longitud de 200 m a 2-5 km y un espesor de 1 a 20 m, así como pequeñas apófisis.

Los estudios del SGM en (García Padilla & Millán Quezada, 2004) ubican al intrusivo en el Oligoceno y se asocia a los pulsos finales del intrusivo diorítico, proporcionó la mineralización de polimetales en el cerro El Toboso y Cerro Prieto; mientras que en la parte sur y central corta al intrusivo riolítico.



*Foto 3.1.3.3. Afloramiento del pórfido andesítico en contacto con la caliza de la Fm. Aurora.*

### Sienita (ToS)

Consiste en un intrusivo de composición félsica de un color blanco-cremoso con una textura fanerítica, con una matriz altamente caolinizada, con pequeños cristales de ortoclasa y hornblenda, mientras que los minerales secundarios son tourmalina y cuarzo.

El intrusivo se caracterizó con el diagrama de QAPF por medio del estudio petrográfico de la muestra, por lo que la roca se define como una sienita (figura 3.1.3.4).

El intrusivo se encuentra turmalinizado, donde la ortoclasa fue reemplazada con turmalina, como se ve en la muestra JM-09 ubicada en el subcapítulo 4.1 “*Petrografía y minerografía*”).

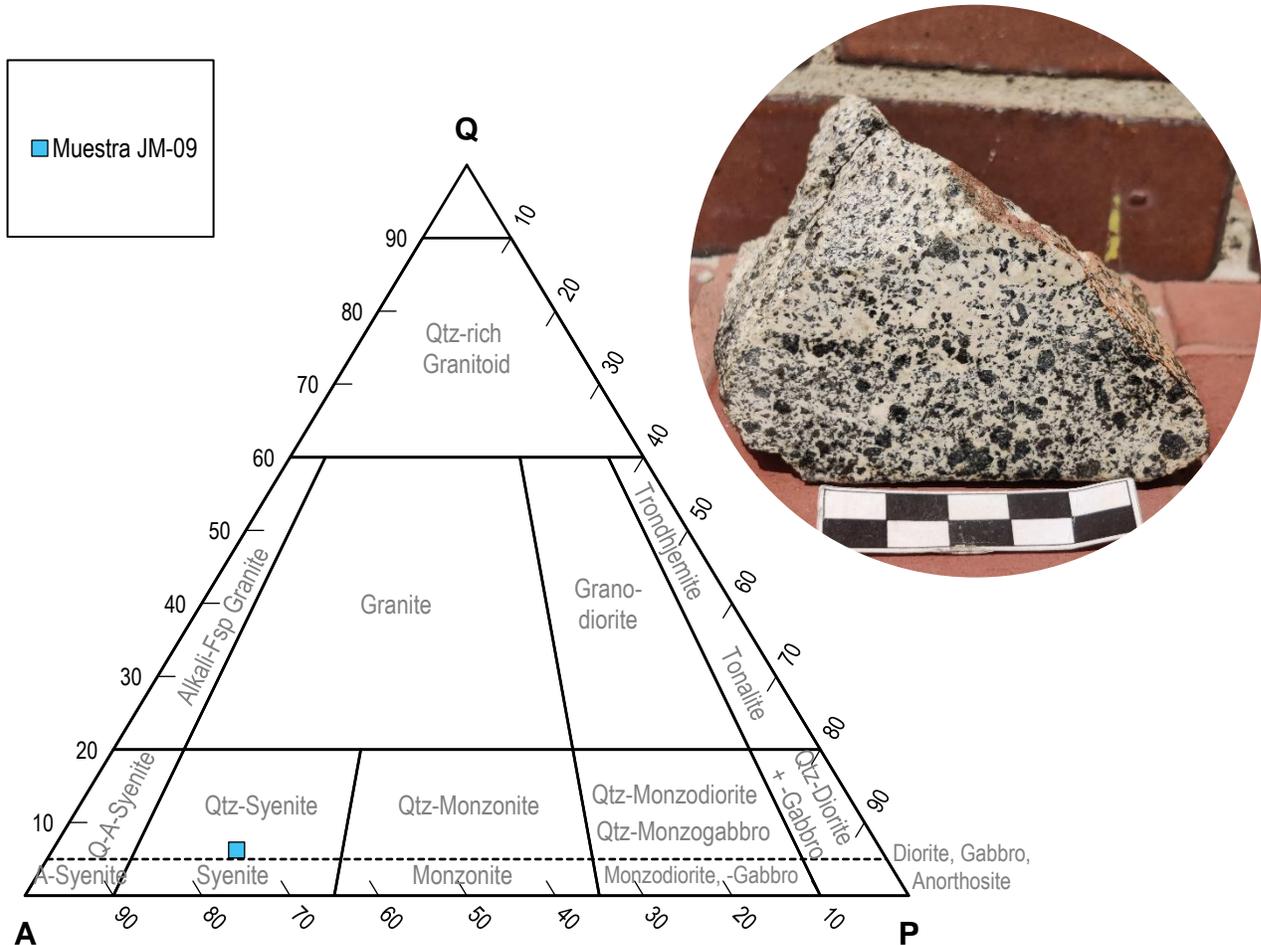


Foto 3.1.3.4. Diagrama QAPF con la muestra del intrusivo, con una fotografía de la muestra de mano.

El tamaño del afloramiento es de 50 cm de largo y 35 cm de ancho con una forma irregular. Aunque se encontró cercano al Cerro El Toboso, por observaciones en campo se propone como el último pulso magmático del intrusivo y con una edad del Cretácico Superior ya que intrusión a la Fm. Caracol, pero no a la Fm. Ahuichila.

### **Mármol (ToM)**

El mármol es de un color blanco con bandas grises, se encuentra en contacto con caliza de la Fm. Aurora. Está conformado por cristales de calcita y periclasa que está alterada a brucita, no contiene mineralización observable (Muestra JM-01 ubicada en el subcapítulo 4.1 “Petrografía y minerografía”).

El mármol por las relaciones estratigráficas y minerales observadas se propone como producto de la marmorización de la Fm. Aurora, tomando en cuenta que no contiene wollastonita en su estructura y la Fm. Cuesta del Cura tiene pedernal.

La zona de mármol es un anillo que rodea al intrusivo El Sarnoso, fue observada cercana al pueblo de Dinamita, el afloramiento consistía en un cerro pequeño que estaba rodeado de caliza y al gossan, a pesar de no observar el contacto con el intrusivo granodiorítico de El Sarnoso la cercanía a este es aproximadamente de 300 m, por lo que la formación del mármol es producto de dicho intrusivo.

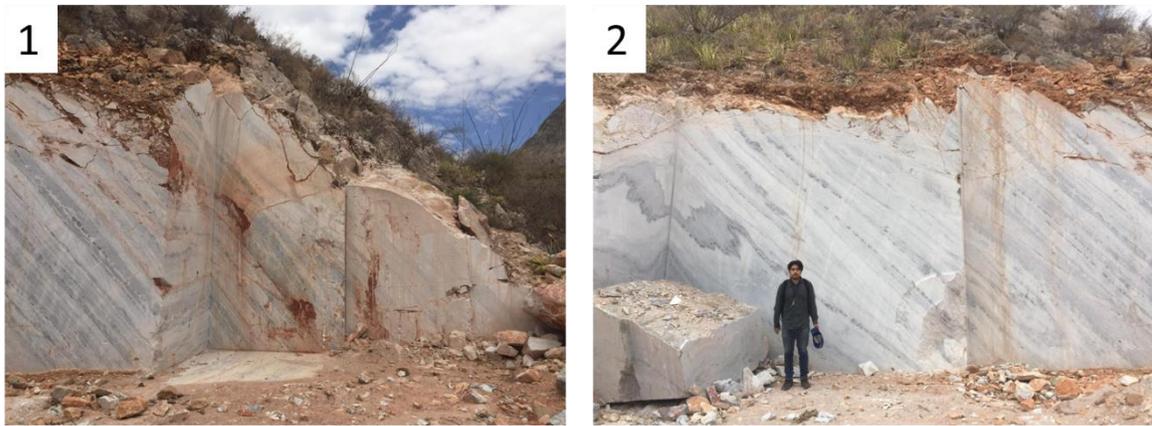


Foto 3.1.3.5. Afloramiento de mármol con bandas grisáceas cercano al pueblo de Dinamita.

La explotación del mármol se lleva a cabo por varias compañías ubicadas en el pueblo de Dinamita y La Mina, donde el mármol tiene una menor cantidad de franjas grises.

### Gossan

El término "gossan" proviene del Cornualles (región inglesa) que se les da a los sulfuros teñidos con hierro y erosionados químicamente, también se le conoce como *chapeau de fer* en francés, *eisener Hut* en alemán y *coloradas* en español (Kelly, 1981).

Son producto de la interacción de agua meteórica con vetas ricas en sulfuros, donde los sulfuros son oxidados creando bandas de óxidos. Se presentan muy cercano a zonas ricas en sulfuro, sin embargo, en campo no se observó ningún manto y/o chimenea cercana.

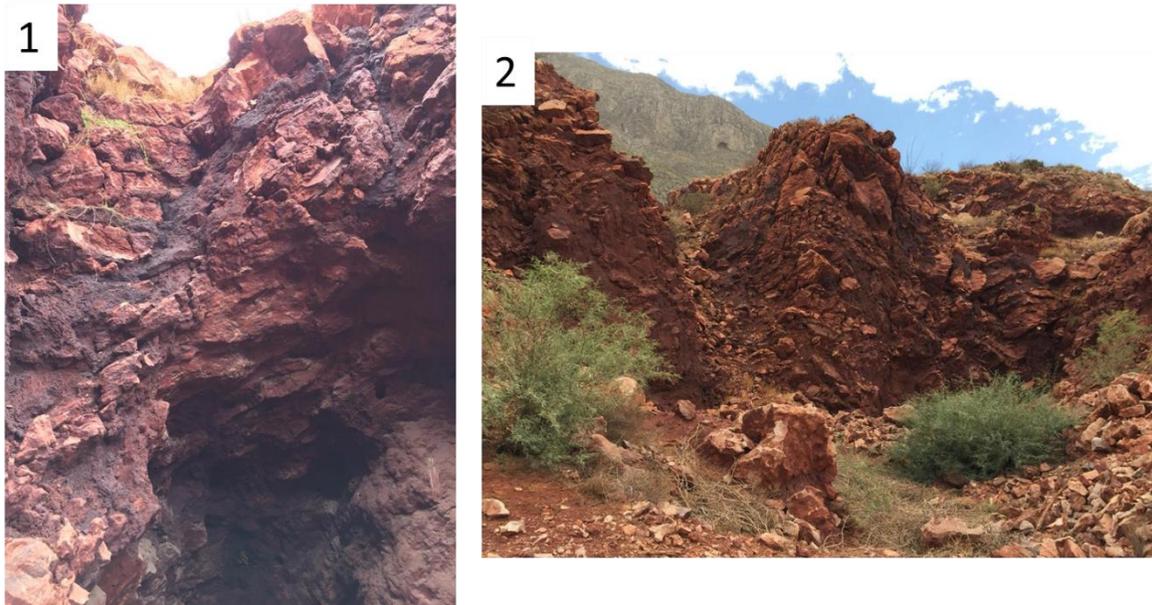


Foto 3.1.3.6. Afloramiento del gossan donde se observan las bandas rojizas ricas en Fe y bandas negras ricas en Mn.

Los minerales observados principalmente son óxidos de hierro lo que le da una tonalidad rojiza parda al afloramiento, sin embargo, se observaba una concentración alta de manganeso que corresponden a las bandas negras.

El pequeño cerro de gossan se observa que fue explotado en el pasado por el alto contenido de hierro, zinc y plomo. Se describe la muestra JM-52 que corresponde al gossan en el subcapítulo 4.1 “*Petrografía y minerografía*”).

### 3.1.4 Cuaternario

#### **Coluvión**

Sedimentos constituidos por gravas de las formaciones aflorantes, con una geometría de subangulosos a subredondeados, que en ocasiones están pobremente cementados por caliche o arcilla; se ubican en su mayoría en el pie de monte.

#### **Aluvión**

Sedimentos ubicados en los valles, sin consolidación alguna conformado por arenas, limos y arcillas, su espesor es muy variable, desde ser una capa casi inexistente hasta cientos de metros. Conforman los valles del Bolsón de Mapimí.



*Foto 3.1.4.1. Afloramiento de una capa de aluvión a la entrada del camino a la mina “La Ojuela”.*

### 3.2 Geología estructural.

La mina “La Ojuela” se encuentra en un anticlinal recostado al este, donde su eje axial se inclina hacia el norte, por esta razón el pliegue se entierra debajo del aluvi3n (MacLeroy, Franquesa, & Romero, 1977), es la estructura mayor en el 3rea de estudio, sobresale en el bols3n del mismo nombre asimismo es la sierra de mayor altitud en la zona. Tiene una longitud de 48 km aproximadamente, sin embargo, es cortado a 10 km al sur por el intrusivo El Sarnoso que interrumpe la sierra de Mapim3.

El Anticlinal de Mapim3 consiste en varios pliegues apretados en la Fm. Aurora con una direcci3n entre NW 35°-45° SE (Garc3a Padilla & Mill3n Quezada, 2004), ver figura 3.2.1.

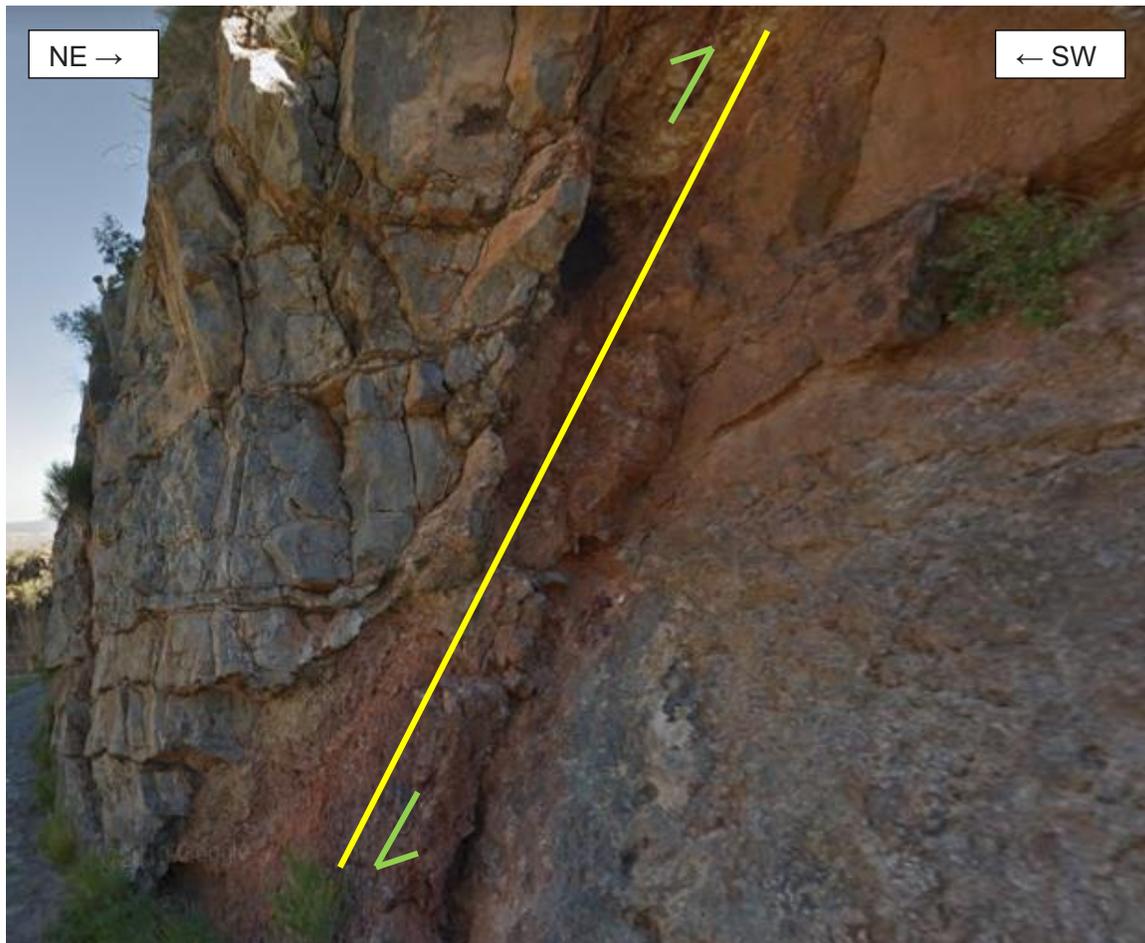


*Foto 3.2.1. Plegamiento de la Formaci3n Aurora dentro del Anticlinal de Mapim3. Vista al NE-SW.*

La litolog3a heterog3nea en la zona crea diferentes tipos de estructuras tanto fr3giles y d3ctiles. Se tiene una serie de cabalgaduras tipo d3plex siendo la principal “El Muerto” en donde la Fm. Indidura est3 cabalgando a la Fm. Aurora, mientras la cabalgadura “San Carlos”, “La Ojuela” y “El Socorro” se encuentran en la Fm. Aurora (Garc3a Padilla & Mill3n Quezada, 2004), el mismo autor propone rumbos entre NW 30°-40° SE, con longitud

máxima de hasta 7 km. Cabe destacar que las direcciones de las cabalgaduras coinciden con la dirección del anticlinal.

Se tienen también fallas de tipo inversa producto del cabalgamiento. En el camino de Mapimí al pueblo de la Ojuela se encontró una falla inversa con un desplazamiento de hasta 4 m con una dirección NW 35° 74° (ver figura 3.2.2.).



*Foto 3.2.2. Falla de tipo inversa en el camino al pueblo de La Ojuela, presenta una fuerte oxidación.*

En el estudio de (MacLeroy, Franquesa, & Romero, 1977) se observaron fallas dentro de mina casi verticales con un desplazamiento de hasta 100 m, coinciden con los planos axiales de los anticlinales. Además, sirvieron como conducto mineralizante.

En (Moore, 2003) se propone una sección perpendicular a las estructuras geológicas en el que se observan las cabalgaduras y los anticlinales.

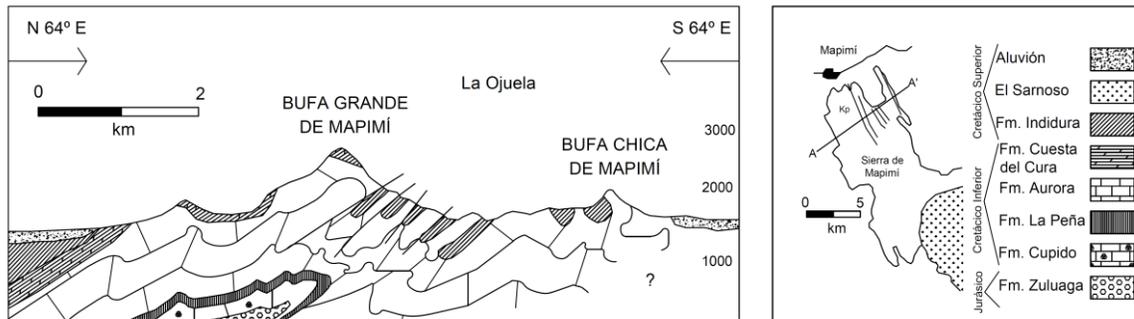


Figura 3.2.1. Sección transversal a las estructuras geológicas. Tomado y modificado de (Moore, 2003).

### 3.3 Descripción de la mina “La Ojuela”.

El distrito minero de La Ojuela desde sus inicios hasta el año 2023, tiene un aproximado de 40 km de obras mineras entre tiros, túneles y socavones, en el estudio del Servicio Geológico Mexicano realizado por (García Padilla & Millán Quezada, 2004) hacen mención casi 14 mil metros de barrenación a diamante solo en exploración.

La mina consta de 16 niveles según información obtenida por medio de entrevistas a pobladores de la zona con una separación de 30 a 50 metros entre cada nivel aproximadamente. La entrada de la mina se encuentra a 1658 m.s.n.m., donde llega el famoso puente de “La Ojuela”.

El nivel 0 se encuentra abierto a los visitantes y es el que sirve de museo en la actualidad; junto con la entrada del nivel 1 y nivel 2 se realizó la descripción para este trabajo, por motivos de seguridad y permisos no se pudo ingresar a una mayor profundidad.

El museo se encuentra a cargo del Ejido Mapimí, por lo cual el acceso a la mina es controlado. La comunidad utiliza el museo como fuente de turismo por su alto valor histórico, se ha ido adaptando con el tiempo para el ingreso seguro de los visitantes agregando y cambiando tablas de madera en lugares inestables. El museo consta de una colección de rocas y minerales encontrados en los diferentes niveles, así como noticias en periódico e informes viejos de inicios del siglo XX.

El nivel 0 tiene una longitud de aproximadamente 600 m, con una entrada de 3x3 m, en el inicio de la obra se encuentra el tiro principal que era utilizado antiguamente y único que comunica los 16 niveles.

La mina casi en su totalidad se encuentra emplazada en caliza mayoritariamente de la Fm. Aurora y algunas partes en la Fm. Indidura.

No se tiene un mapa a detalle de las obras mineras en el distrito por el tiempo en el que ha sido explotado, así como porque ha pasado por varios dueños. Sin embargo, Megaw en (Moore, 2003) describe siete grandes estructuras: La Ojuela (Paloma), San Vicente, San Ignacio (Monterrey), San Nicolas, San Judas, San Jorge – San Juan y San Antonio (Cumbres); en donde se concentran la mayoría de los trabajos subterráneos (figura 3.3.1).

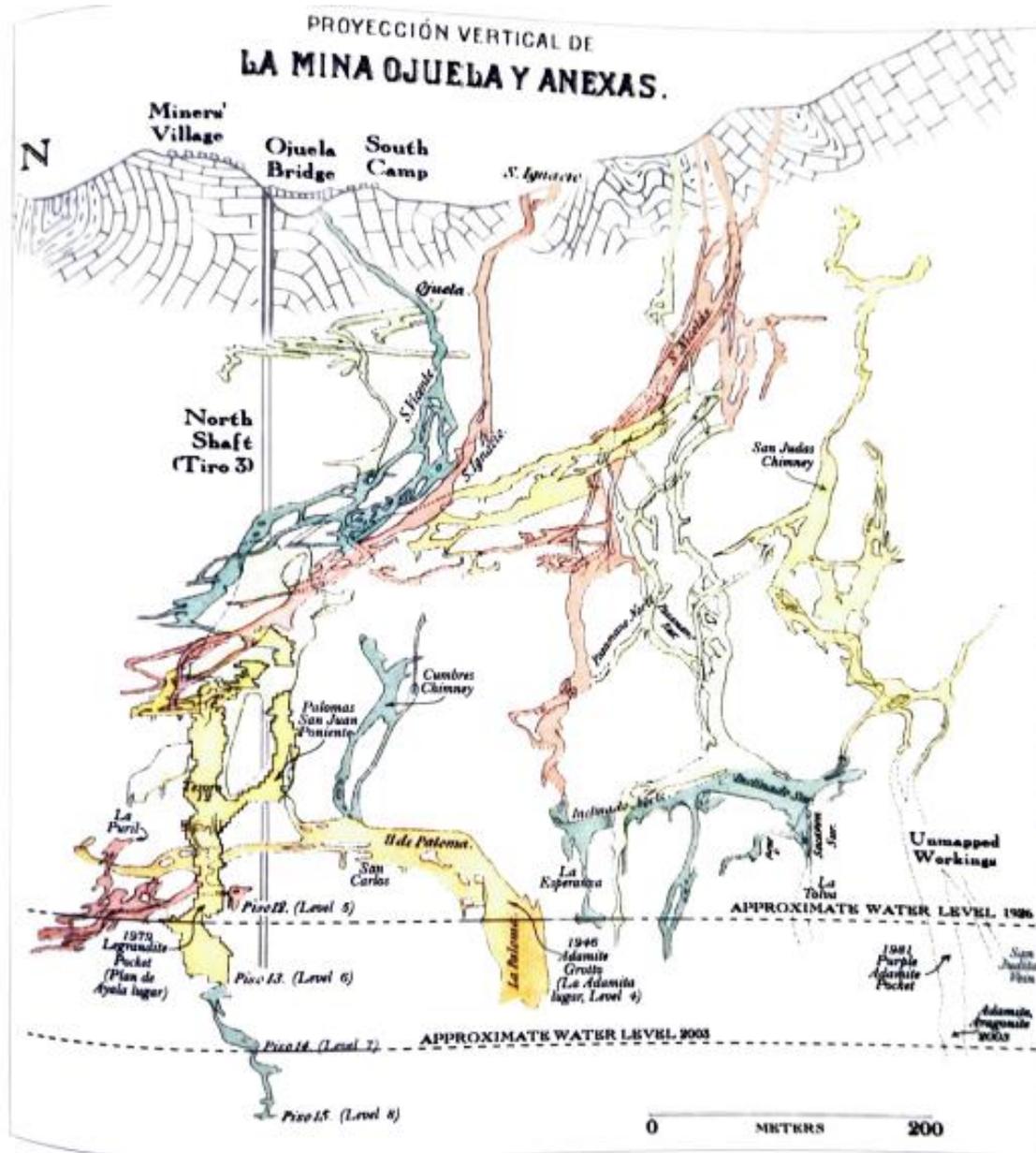


Figura 3.3.1. Mapa esquemático de las obras mineras en el distrito minero La Ojuela por Peter Megaw. Tomado de (Moore, 2003).

La chimenea de La Ojuela que se encuentra ubicada en la entrada de la mina es la que comunica desde el nivel 0 hasta el nivel más bajo. Fue la primera estructura mineralizada descubierta por los españoles (MacLeroy, Franquesa, & Romero, 1977), Peñoles después la nombraría como “Boca Mina”.

El tiro de La Ojuela sirvió para que los españoles empezaran a construir los primeros niveles subterráneos, sin embargo, la minera Peñoles con sus socios fueron los que más profundizaron creando una red más compleja de túneles.

Por información obtenida por medio de entrevistas a ejidatarios se comenta que el ingreso a niveles inferiores al seis es prácticamente imposible porque se encuentran inundado actualmente los trabajos mineros, sin embargo (Moore, 2003) menciona era posible bajar hasta el nivel 12.

### 3.4 Descripción estructuras mineralizadas.

Las estructuras mineralizantes corresponden a mantos y chimeneas. Los minerales de mena consisten en esfalerita, galena argentífera, calcopirita y tetraedrita, con una ganga de fluorita, calcita, piritita y arsenopirita en la zona de sulfuros. Estos se encuentran en niveles inferiores al 5, mientras que la zona superior se encuentra oxidada y llena de una gran variedad de minerales supergénicos donde destacan los arseniatos como legrandita, adamita, paradamita, mapimita, lotharmeyerita, miguelromeroita y ojuelaita.

Como se menciona en el punto 3.3, Megaw en (Moore, 2003) distingue siete grandes estructuras: La Ojuela (Paloma), San Vicente, San Ignacio (Monterrey), San Nicolas, San Judas, San Jorge – San Juan y San Antonio (Cumbres).

A profundidad cercana a la fuente mineralizante se encuentra segmentado representado por cobre, plomo-zinc, plomo-plata y carbonatos, siendo los últimos los más cercanos a superficie (García Padilla & Millán Quezada, 2004). A mayor profundidad encontramos cobre y zinc, mientras que los valores de plomo y la plata aumentan conforme se está más cercano a superficie (ver foto 3.4.1).

La primera estructura descubierta fue la chimenea “*Ojuela Vieja*” o también conocida como “*Boca Mina*” que se encuentra en la entrada de la mina y es la única estructura que comunica a todos los niveles. En el estudio de (García Padilla & Millán Quezada, 2004) se analizaron muestras en la zona oxidada de la chimenea de *Boca de Mina* que dieron valores de Au=5 g/t, Ag=750 g/t, Pb=25 %, Zn=30 %. Mientras que en la zona de sulfuros las leyes fueron las siguientes: Au= 3 g/t, Ag=500 g/t, Pb=10 %, Zn=15 %.



*Foto 3.4.1. Chimenea de Boca Mina, en la entrada del nivel 0.*

Al interior de mina a 20 m de la entrada se observa una de falla de tipo normal con dirección  $40^{\circ}\text{SE}/81^{\circ}$  en calizas, el bloque de piso se encuentra oxidada presentando un color rojizo, mientras que el techo tiene fracturas rellenas de caliza; en el plano de falla se observa silicificación y escurrimiento de agua. (foto 3.4.2.).



La chimenea coincide con la dirección y buzamiento de la falla, se observan arcillas rojizas producto de la oxidación. Se observaron pequeños cristales de malaquita, fluorita, pirita y esfalerita en ambas tablas.

Donde se ubica el museo de la mina turística aproximadamente en la mitad del túnel se observa un contrapozo de aproximadamente 7 m de altura respecto al nivel 0 y de 2 hasta 5 m de ancho, por lo que comentan los guías aseguran

que ese contrapozo llega hasta el nivel 2.

*Foto 3.4.2. Falla de tipo normal.*

Otro cuerpo de gran importancia es la chimenea *Cumbres* (ver figura 3.4.1), está se encuentra inclinada emplazada en el plano axial de un anticlinal (García Padilla & Millán Quezada, 2004). Con una profundidad de hasta 350 m y un diámetro de 10 m. La zona de óxidos se encuentra definida hasta un horizonte dolomítico de la Fm. Aurora.

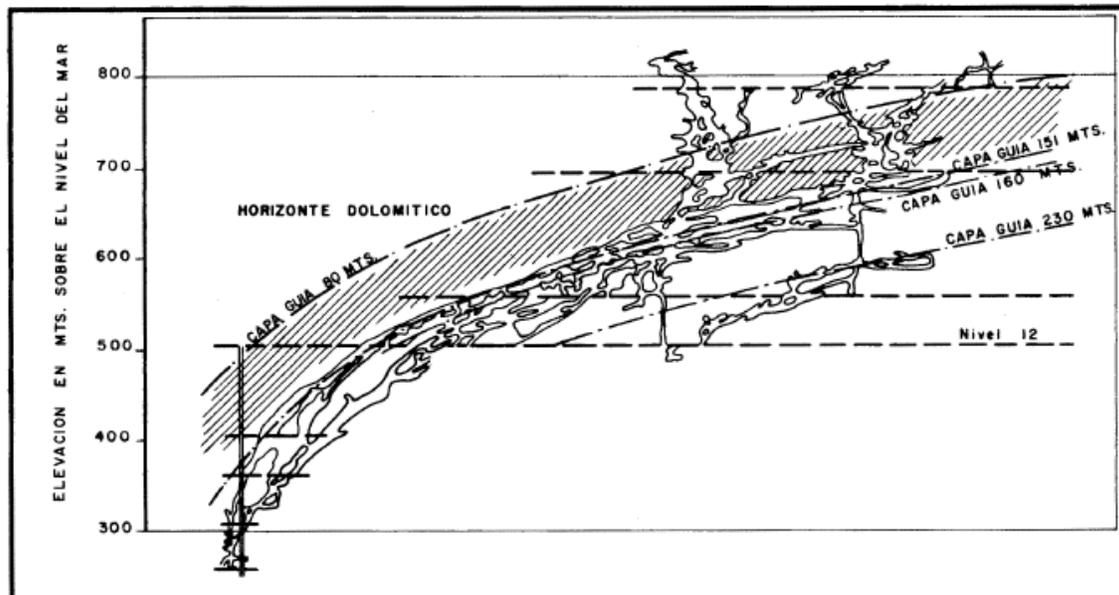


Imagen 3.4.1. Chimenea Cumbres, sección longitudinal. Tomado y modificado de (MacLeroy, Franquesa, & Romero, 1977).

La chimenea de *Cumbres* consiste en una chimenea principal con varias chimeneas conectadas a la principal. Fue después de Boca Mina el cuerpo más importante en la explotación en el siglo XX con un aproximado de 1 millón de toneladas entre óxidos y sulfuros (MacLeroy, Franquesa, & Romero, 1977).

El sistema de fallas y pliegues se ha observado en superficie, (García Padilla & Millán Quezada, 2004) propone que dicho sistema pueda convertir los mantos en chimeneas.

El manto *San Diego* se encuentra emplazado en un horizonte de dolomía en la Fm. Aurora, tiene un espesor de 100 m, hacia superficie se convierte en una chimenea con un diámetro de hasta 50 m (García Padilla & Millán Quezada, 2004).

El manto *San Carlos* es el más importante ya que comunica varias chimeneas entre ellas la Boca Mina, San Judas, Socavon y San Ignacio (Moore, 2003). Consiste en cuerpos aislados de 30 a 100 m con calizas intermedias estériles y un espesor de 1 a 5 m con una profundidad a echado de manto de 600 m (García Padilla & Millán Quezada, 2004). Las leyes obtenidas en el mismo estudio son de: Ag=600 g/t, Pb=18 %, Zn=7.5 %. Ver foto 3.4.3.



Foto 3.4.3. Foto del manto *San Carlos*. Tomada de (García Padilla & Millán Quezada, 2004).

La mineralización se encuentra controlada por la geología estructural, siendo los ejes axiales de los pliegues la zona de mayor debilidad donde los cuerpos mineralizantes se encuentran (ver figura 3.4.2) (MacLeroy, Franquesa, & Romero, 1977).

Así como, el horizonte dolomítico sirvió como tapón para los fluidos hidrotermales concentrando el mineral por debajo de esta capa.

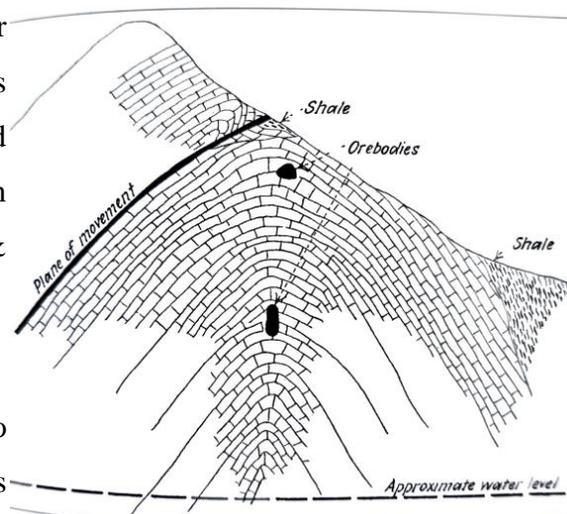


Imagen 3.4.2. Sección esquemática de zonas mineralizadas. Tomado y modificado de (MacLeroy, Franquesa, & Romero, 1977).

## 4. Técnicas analíticas

En este capítulo se mencionan las técnicas analíticas que se realizaron para la descripción de las unidades litológicas de la zona, así como DRX para minerales de difícil descripción.

### 4.1 Petrografía y minerografía.

#### 4.1.1 Muestra JM-01

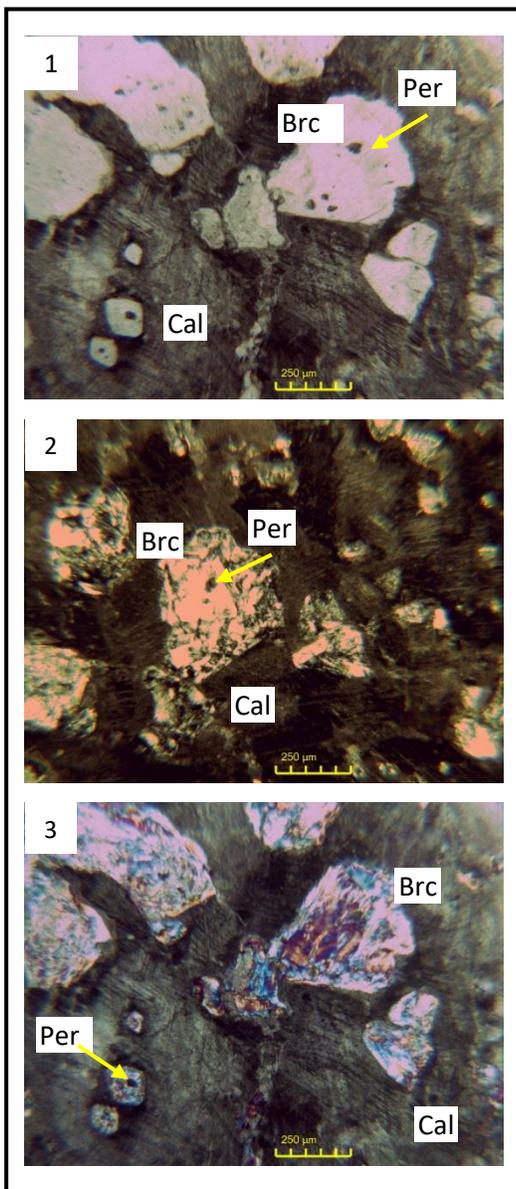


Foto 4.1.1.1. Lámina delgada JM-01.

La muestra es un mármol de color blanco con pequeñas bandas de color grisáceo. En el microscopio se observan cristales euhedrales y subhedrales de calcita con dolomita de color crema-grisáceo, se utilizó rojo de alizarina para determinar si se trataban de cristales puros de calcita.

Conjuntamente se tienen cristales subhedrales de brucita producto de la alteración de periclase, estos últimos son de tipo isotrópico por lo cual se ven dentro de la brucita. Con una textura granoporfidoblástica donde los cristales de brucita sobresalen sobre los de calcita.

Eventos posteriores provocaron pequeñas fracturas y vetillas que cortan a los cristales de brucita, están rellenas de cristales de calcita y en algunos casos de minerales opacos, así mismo se ven pequeños cristales opacos diseminados que pueden ser óxidos de hierro y/o manganeso.

Fotografías: (1) Mármol con cristales de brucita y periclase (isotrópico) dentro de este, con una fractura rellena de calcita, sin analizador. (2) Mármol con nicols cruzados a observar en el centro de la brucita un mineral isotrópico que es lo que queda de la periclase. (3) Misma fotografía que la (1) más nicols cruzados y placa de cuarzo.

#### 4.1.2 Muestra JM-04

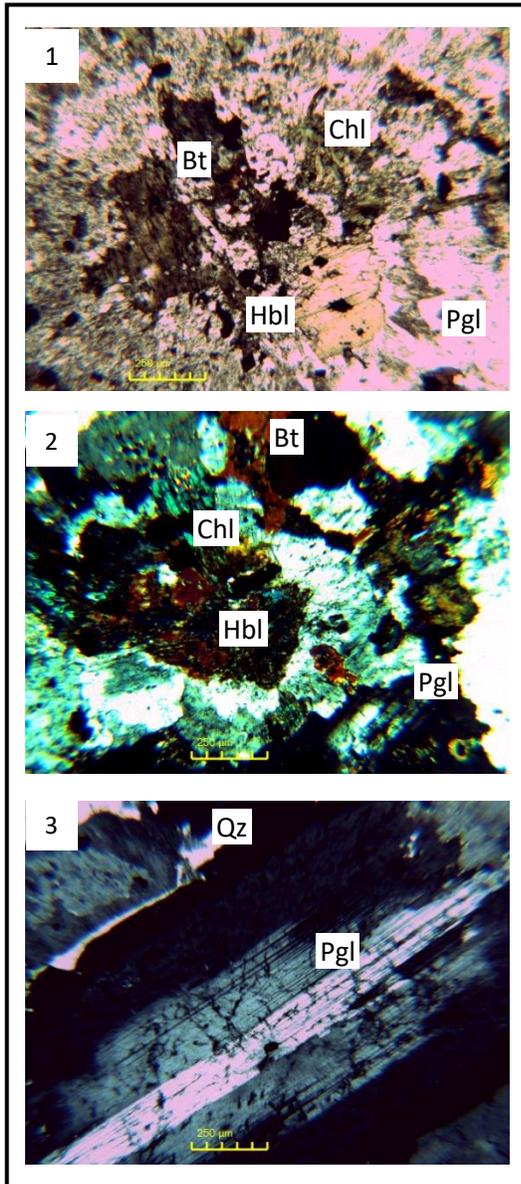


Foto 4.1.2.1. Lámina delgada JM-04.

La muestra corresponde al intrusivo El Sarnoso. Es de color blanco-verdusco al fresco con una textura fanerítica con cristales de biotita, hornblenda en una matriz de plagioclasa, con presencia de arsenopirita y pirita.

En la lámina delgada se observan cristales euhedrales de hornblenda con una cloritización selectiva avanzada donde se puede distinguir minerales del grupo de la clorita como: clinocloro y clorita. De un color pardo y con cristales anhedrales se tiene biotita. La matriz consta de cristales de plagioclasa, los cristales idiomorfos que están zoneados. Además, se tiene microlina y cuarzo euhedral, que representan el 10 %.

Se tiene una textura aplítica donde el tamaño de los cristales no es muy grande, mientras que en la parte de la plagioclasa zoneada se tiene una textura intergranular en donde el cuarzo cristalizó en los espacios disponibles.

Se tienen minerales accesorios, que representan un 10 %, como biotita, pirita, arsenopirita y otros opacos no reconocidos en lámina delgada.

Fotografías: (1) Granodiorita con cristales de biotita xenomorfa, plagioclasa, y hornblenda que se está alterando a clorita, sin analizador. (2) Misma fotografía que la (1) con nicols cruzados a observar en el centro se observa más claro como la hornblenda se está cloritizando. (3) Cristal euhedral de plagioclasa que se encuentra zoneado, en uno de los intersticios se encuentra relleno de cuarzo, nicols cruzados.

### 4.1.3 Muestra JM-09

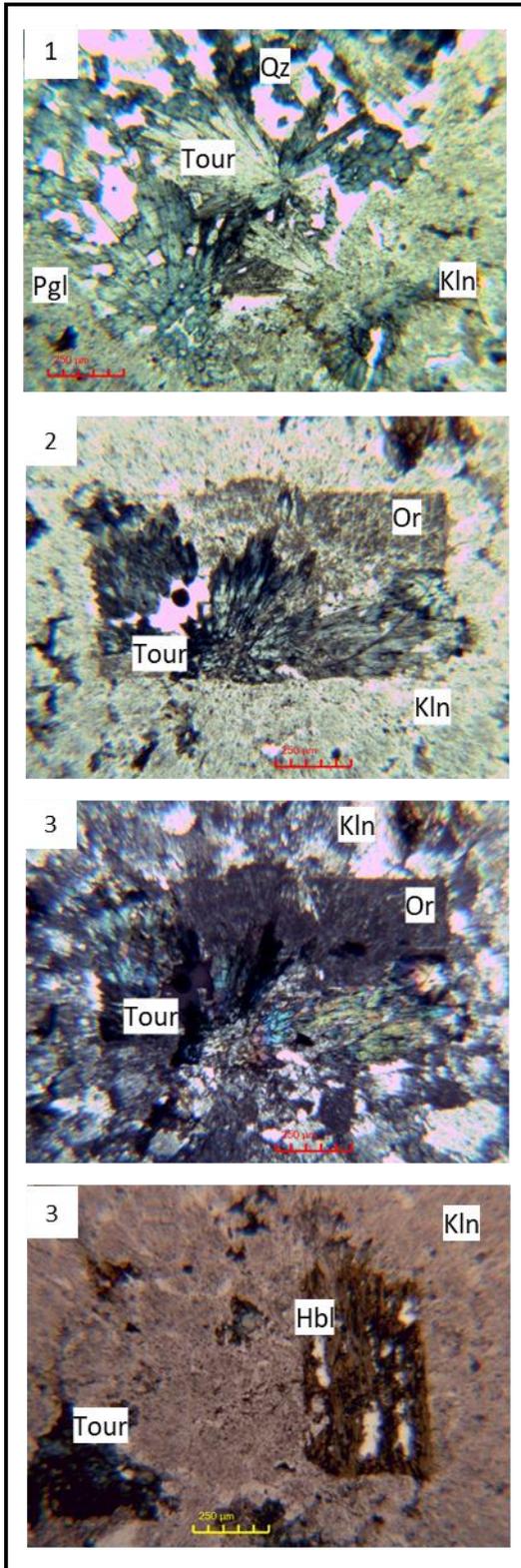


Foto 4.1.3.1. Lámina delgada JM-09.

La muestra corresponde a una sienita de color blanco, con una textura porfídica, donde la matriz se encuentra caolinizada con fenocristales de ortoclasa y tourmalina, además tiene otros minerales como hornblenda y cuarzo.

En la lámina delgada se observan dos tipos de alteración. La primera es una caolinización avanzada en la matriz formada por plagioclasa y en los cristales euhedrales de hornblenda, sin embargo, a pesar de la caolinización quedan cristales de hornblenda distinguibles.

La segunda es una tourmalinización selectiva e incipiente en los cristales de idiomorfos de ortoclasa que están siendo reemplazados por turmalina euhedral y subhedral, de color azul con una forma radial.

Se tiene una textura porfídica donde la ortoclasa y hornblenda destacan por su gran tamaño respecto a la matriz. El cuarzo es un mineral secundario y fue el último en cristalizar, como evidencia se tiene una textura intergranular en donde la ortoclasa que fue reemplazada con turmalina, se observan cristales de cuarzo en los intersticios dejados por la turmalina.

Fotografías: (1) Cristales de turmalina tabulares color azul con cuarzo intercrecido en algunos espacios, la matriz es de plagioclasa que se encuentra caolinizada, sin analizador. (2) Cristal de ortoclasa en el centro, se observa como la turmalina está creciendo en una forma radial encima y respetando los límites de la ortoclasa., sin analizador. (3) Misma fotografía que la (2) más nicoles cruzados. (4) En la parte derecha se observa un corte transversal de un cristal de hornblenda muy alterado con algunas cavidades, mientras que en la parte inferior izquierda se ven cristales de turmalina.

#### 4.1.4 Muestra JM-10

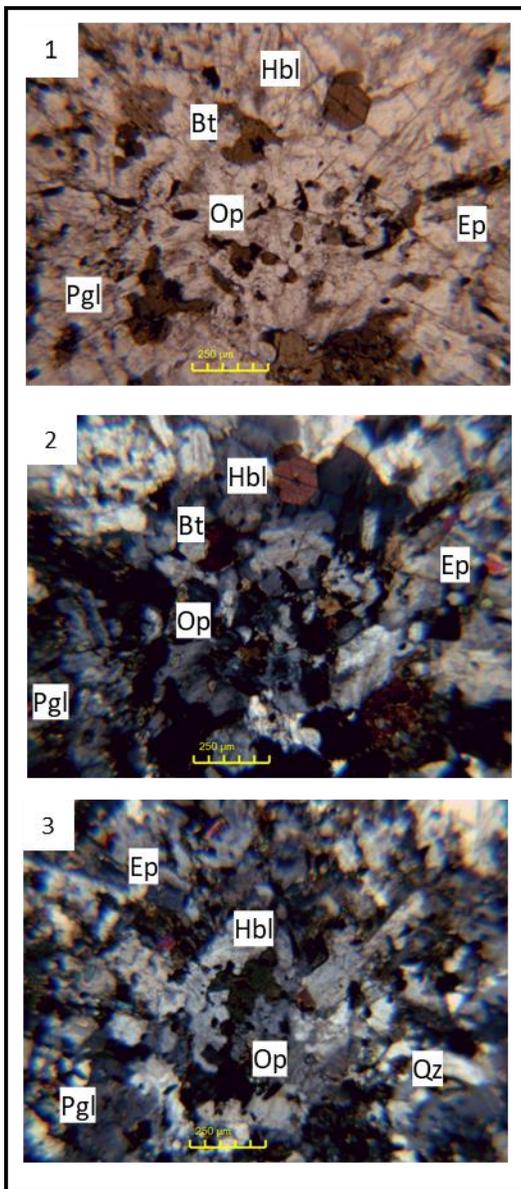


Foto 4.1.4.1. Lámina delgada JM-10.

La muestra corresponde al xenolito del intrusivo El Sarnoso, de color gris-negruzco no es distinguible ningún mineral en muestra de mano.

En microscopio se observan cristales de hornblenda idiomorfos, sin embargo, la mayoría son xenomorfos de un color verde-pardo en una matriz de cristales subhedrales-euhedrales maclados de andesina-labradorita

Algunas hornblendas se encuentran epidotizadas que son generalmente las xenomorfas, por lo que se infiere que el arrastre de los xenolitos fue durante la cristalización de El Sarnoso por las condiciones de P/T para la formación de epidota.

Se tiene una textura aplítica y consertal en donde la hornblenda está epidotizada. Se tienen minerales opacos que son xenomorfos y se encuentran esparcidos en toda la muestra.

Se tienen minerales accesorios, que representan un 10 %, como biotita, cuarzo y minerales opacos no reconocidos en lámina delgada.

Fotografías: (1) En la parte central superior se ve un cristal de hornblenda idiomorfos, los cristales xenomorfos son hornblenda epidotizada, la matriz consta de plagioclasa, se observan algunos minerales opacos en esparcidos en el centro de la muestra, sin analizador. (2) Misma fotografía que la (1) a observar el color rosado de 2do orden de la epidota, nicoles cruzados. (3) Cristal en el centro de hornblenda xenomorfo, en la parte inferior derecha se observan pequeños cristales idiomorfos de cuarzo. La coloración rosada corresponde a epidota, nicoles cruzados.

#### 4.1.5 Muestra JM-12

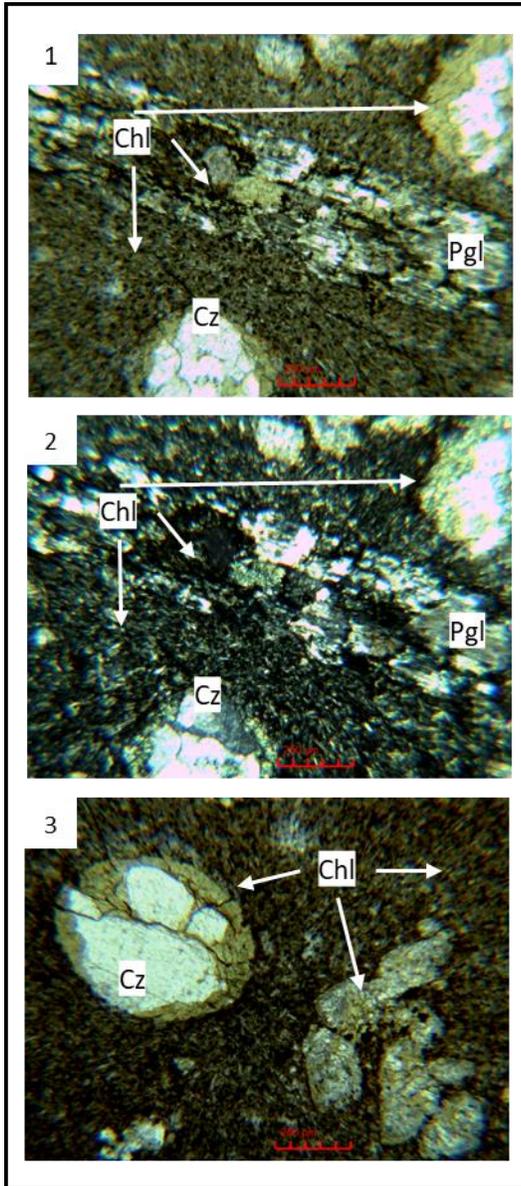


Foto 4.1.5.1. Lámina delgada JM-12.

La muestra es un intrusivo andesítico porfídico de color verde olivo al fresco, mientras que intemperizada es de color rojiza producto de la oxidación. La matriz se encuentra cloritizada, como mineral secundario se tienen cristales de calcita relleno de cavidades

En la lámina delgada se observa una matriz de plagioclasa con una cloritización avanzada en la que se distingue clorita y clinoclino. Se tienen cristales fantasmas de plagioclasa euhedral donde están casi en su totalidad reemplazados por clorita y clinoclino, sin embargo, aún es posible ver la forma tabular de la plagioclasa.

Se observa una textura amigdalal donde la calcita euhedral que es un mineral secundario relleno de cavidades producto de la descomposición de minerales ferromagnesianos, asimismo la calcita presenta una corona de clorita y en ocasiones la clorita se encuentra en el centro de los cristales de calcita.

La muestra tiene muy pocos minerales opacos menor al 5 % de la muestra.

Fotografías: (1) En la parte central se observa un cristal de plagioclasa que tiene una textura fantasma, está siendo reemplazado por clorita (color verde limón) y clinoclino (verde azulado), en la parte inferior se tiene una calcita con una corona de clorita, la matriz de la roca se encuentra cloritizada, sin analizador. (2) Misma fotografía que la (1) se observa como la plagioclasa ha sido reemplazada casi en su totalidad, nicóles cruzados. (3) Cristal en el centro de una calcita con corona de clorita, mientras que en la esquina inferior derecha se observa clorita dentro de la calcita, así como en los bordes, sin analizador.

#### 4.1.6 Muestra JM-15

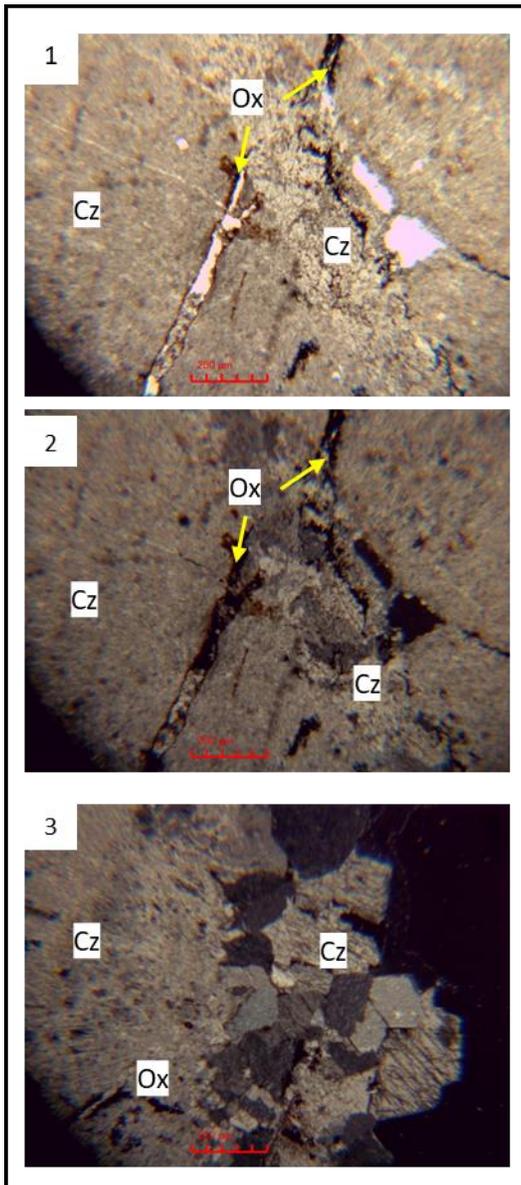


Foto 4.1.6.1. Lámina delgada JM-15.

La muestra pertenece a una caliza tipo mudstone encontrada muy cercana a una falla dentro de la mina, con un color gris oscuro al fresco.

Se observa en microscopio una matriz de micrita que conforma casi en su totalidad a la roca, sin embargo, en las fracturas se tienen cristales subhedrales de calcita, óxidos de hierro y minerales opacos

La deformación causó micro vetillas donde el predominio de los óxidos y minerales opacos es notable, mientras que en las fracturas más grandes solo se observan los cristales euhedrales y subhedrales de calcita.

El color pardo-rojizo de los óxidos se asocian a hematita y limonita, mientras que los minerales opacos en la muestra no son reconocibles.

Fotografías: (1) Muestra de una caliza con matriz de lodo calcáreo, que tiene una fractura en la parte central y esta rellena de cristales de calcita, se tiene una fractura ortogonal que no está rellena en su totalidad y solo contiene óxidos en los bordes, sin analizador. (2) Misma fotografía que la (1) a observar que se tienen óxidos en menor proporción en la matriz como se refleja en la parte inferior central, nicoles cruzados. (3) Cristales de calcita subhedrales relleno una fractura en la caliza, en esta fotografía los óxidos predominan en la matriz, nicoles cruzados.

#### 4.1.7 Muestra JM-18

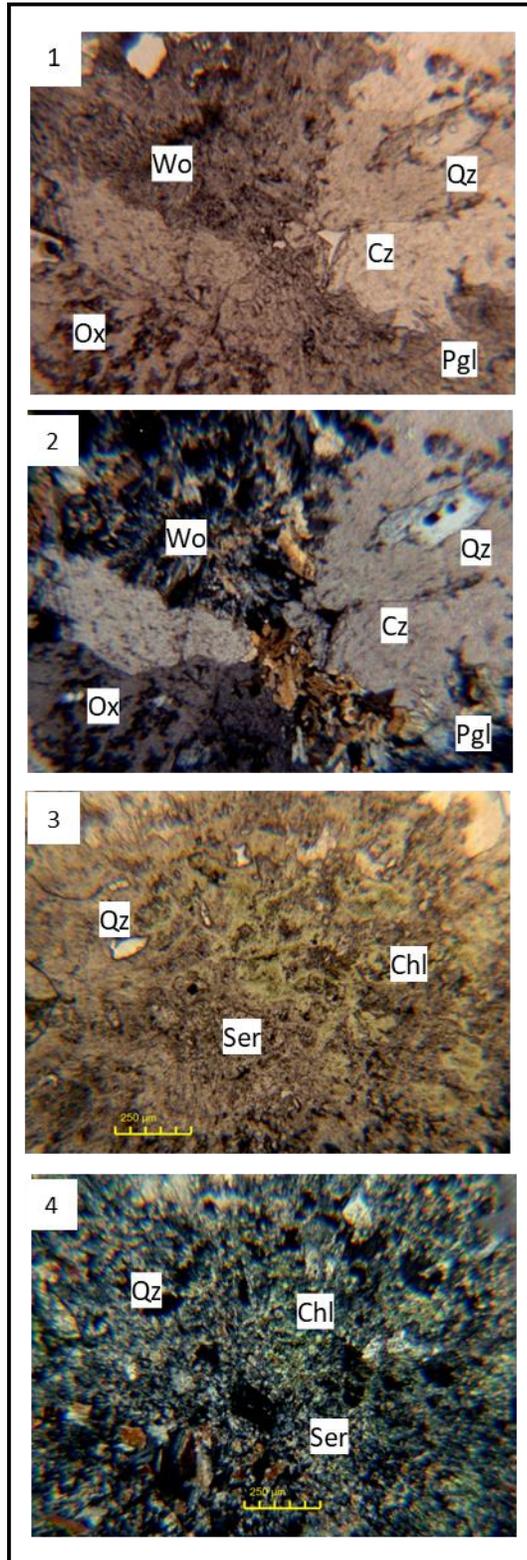


Foto 4.1.7.1. Lámina delgada JM-18.

La muestra es de una veta silicificada que se encuentra al interior de mina en el nivel 0. De un color blanco con verde, en la que se distingue calcita, cuarzo y caolinita.

En lámina delgada se observa que la roca es de origen sedimentario, pero ha sido afectada por fluidos hidrotermales. Se conforma de cristales de calcita subhedrales y cuarzo euhedral embebido en los primeros. Tiene una textura granular.

Se observa una fractura rellena de plagioclasa subhedral, cuarzo euhedral y wollastonita tabular radial. No obstante, otra parte de la muestra está conformada predominantemente por dichos minerales en donde se observa sericita, clorita y caolinita.

Para la descripción del mineral verde fue necesario hacer DRX (subcapítulo 4.2 “Difracción de rayos X”), por lo que se concluye que es calcosiderita. Se tiene presencia de óxidos y minerales opacos que representan un 10 %.

Fotografías: (1) Se observa en la parte central cristales de wollastonita están en contacto con los cristales de calcita, se tiene un cuarzo euhedral solitario en medio de un cristal de calcita, mientras que en la esquina inferior derecha se tiene plagioclasa seritizada, sin analizador. (2) Misma fotografía que la (1) a observar que se tienen óxidos encima de los cristales de calcita, nicoles cruzados. (3) Zona alterada donde destaca el color verde limón de la clorita, se tiene cuarzo euhedral esparcido y arcillas como sericita y caolinita producto del hidrotermalismo, sin analizador. (4) Misma fotografía que la (3) se observa que la zona cloritizada está muy limitada, los cuarzos destacan por su tamaño, nicoles cruzados.

#### 4.1.8 Muestra JM-19

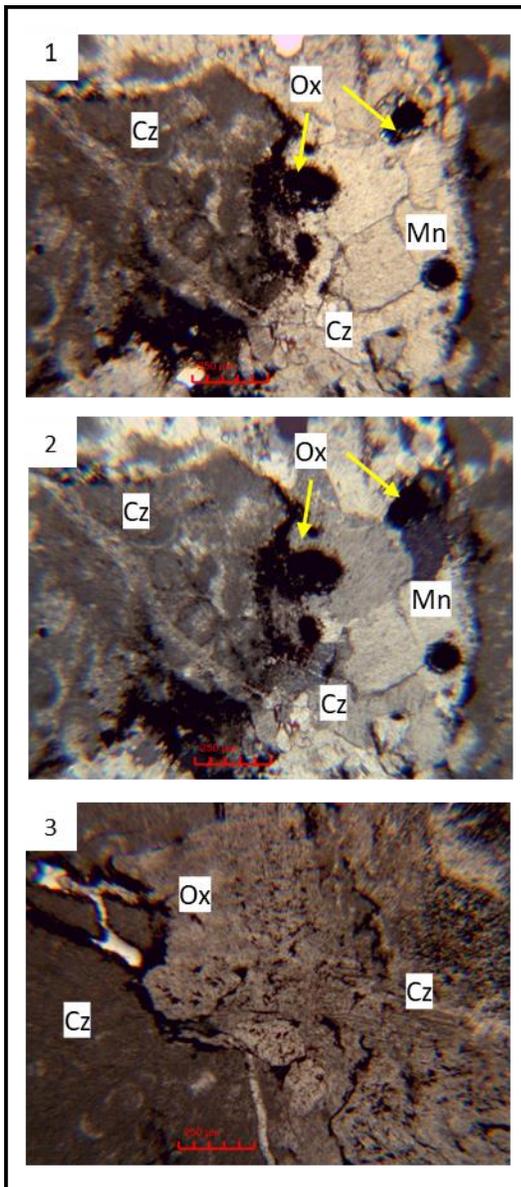


Foto 4.1.8.1. Lámina delgada JM-19.

La muestra es una caliza fosilífera con presencia de foraminíferos bentónicos, con un alto contenido de óxidos por lo que le da un color gris rojizo, se observan al menos 2 familias de fracturas que están rellenas de óxidos y calcita.

En el microscopio se distinguió Miliolidos y Ostracodos en una matriz de lodo calcáreo, se encuentra fracturada por lo que algunos foraminíferos están rotos.

Se tiene fracturas con una mayor abertura donde se cristalizaron calcitas euhedrales y subhedrales, además se tienen óxidos de hierro y manganeso en las fracturas.

Los óxidos tienen una forma anhedral y se presentan en manchones grandes sobre cristales de calcita y/o en los bordes de las fracturas rellenas de estas.

Fotografías: (1) Muestra de una caliza con matriz de lodo calcáreo y Miliolidos que tienen forma ovalada, se observa una microfractura rellena de calcita, en la parte derecha se tiene una fractura más grande con cristales de calcita euhedrales y subhedrales, se ven manchas xenomorfas de óxidos en los costados de la fractura, sin analizador. (2) Misma fotografía que la (1) con nicolas cruzados a observar que se los óxidos se encuentran en la fractura y no en la caliza con Miliolidos. (3) Se observa en la esquina inferior izquierda Ostracodos que tienen forma de gancho. Se tiene una fractura parcialmente rellena de óxidos, así como óxidos sobre los cristales de calcita, sin analizador.

#### 4.1.9 Muestra JM-24

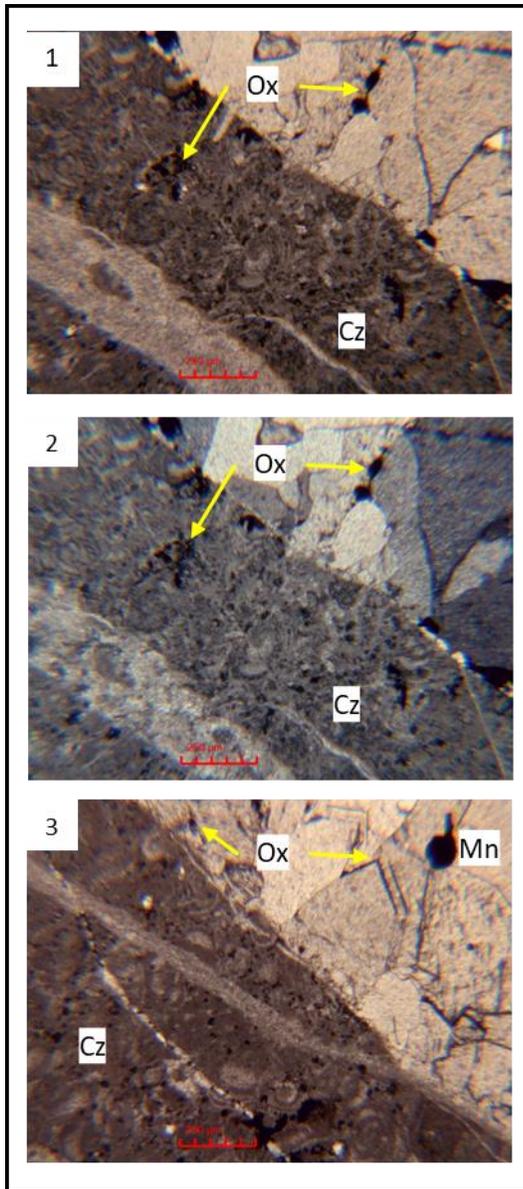


Foto 4.1.9.1. Lámina delgada JM-24.

La muestra corresponde a una caliza tipo mudstone ubicada en el espejo de falla vista en el nivel 0 de la mina, de un color gris claro al fresco, con cristales de de 3 a 5 mm de calcita de una tonalidad crema a transparentes. Se encuentra altamente fracturada.

En microscopio se observa que la parte central de la lámina consiste en una caliza tipo mudstone con lodo calcáreo en su totalidad. Se distinguen micro vetillas las cuales están rellenas de micrita y en ocasiones de cristales de calcita. El contenido de óxido es casi nulo en esta parte de la muestra.

Ambos bordes de la lámina constan de cristales idiomorfos de calcita inequigranulares que crecen en forma de bandas, entre cada cristal se observan óxidos ocupando los espacios.

Los óxidos tienen una tonalidad rojiza, negra y en ocasiones amarilla.

Fotografías: (1) Contacto entre la caliza tipo mudstone con cristales idiomorfos de calcita, los óxidos en la muestra están en los bordes dichos cristales. En la parte izquierda en la caliza se encuentra una fractura rellena, sin analizador. (2) Misma fotografía que la (1) con nicols cruzados a observar que se tiene presencia en menor proporción de óxidos en la caliza tipo mudstone. (3) Se observa una micro vetilla rellena de calcita en la parte izquierda y otra fractura rellena de óxidos, sin analizador.

#### 4.1.10 Muestra JM-25

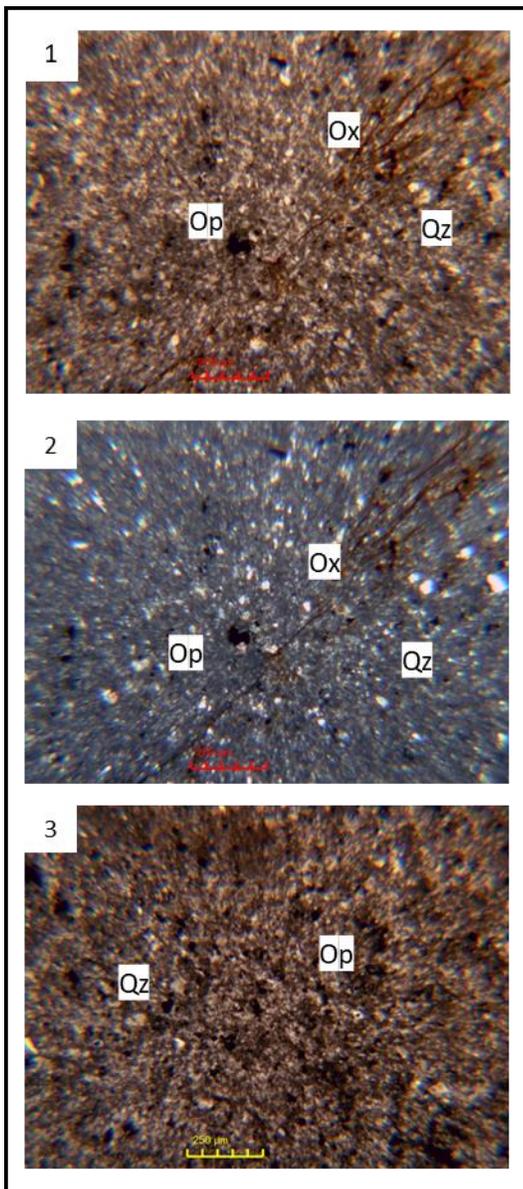


Foto 4.1.10.1. Lámina delgada JM-25.

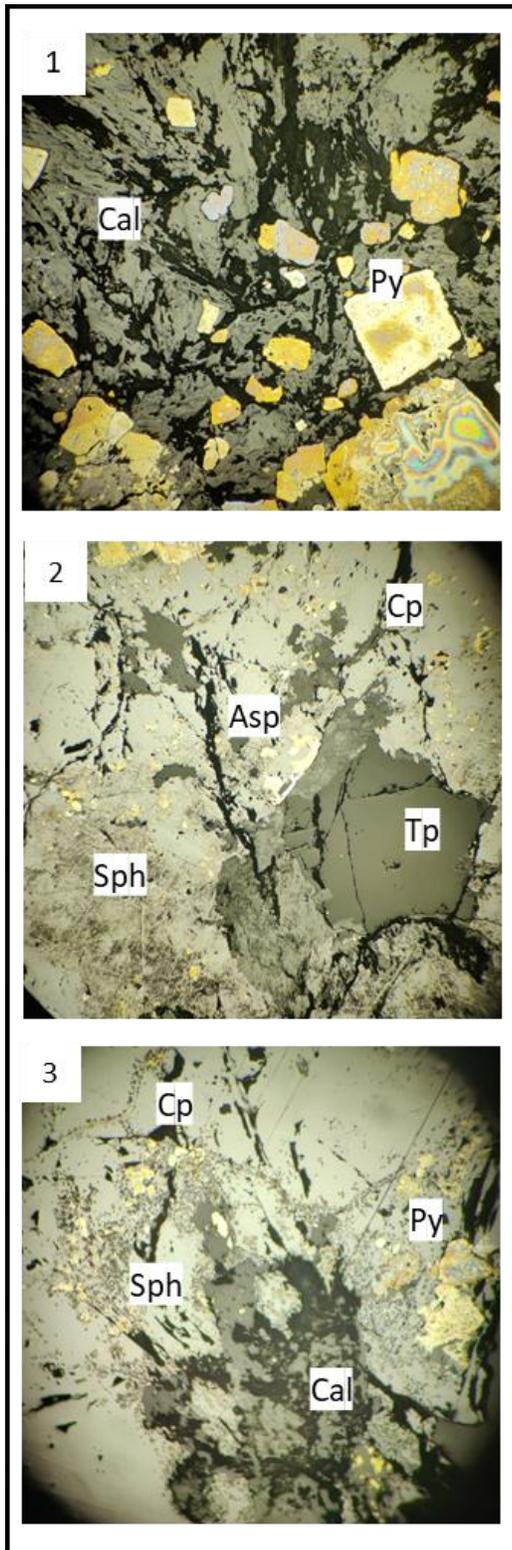
La muestra es una lutita, de color gris al fresco y pardo intemperizada, no se es posible distinguir cristales megascópicamente.

En lámina delgada se observan cristales de diferentes tamaños de cuarzo subredondeados, no tienen una fábrica visible.

La roca tiene un contenido de alrededor de 10 % de minerales opacos, solo se observa una fractura que está rellena de óxidos de hierro.

Fotografías: (1) Muestra de una lutita con fragmentos de cuarzo y minerales opacos esparcidos en la muestra. En la esquina superior derecha la coloración se ve más rojiza por presencia de óxidos, sin analizador. (2) Misma fotografía que la (1) con nicols cruzados se observa más nítida la fractura con óxidos. (3) Se observan como los cristales opacos están en toda la muestra, sin analizador.

#### 4.1.11 Muestra JM-28



La muestra en mano es una calcita con una veta de sulfuro en la cual se distinguen una banda de pirita, calcopirita y una de esfalerita.

En microscopio se observó cristales euhedrales de pirita cúbica, de los cuales se tiene una alteración selectiva de algunos cristales en los que se distingue una coloración de arcoíris. Además de cristales subhedrales de esfalerita. En la zona de fractura se tienen cristales xenoformos de calcopirita y pirita.

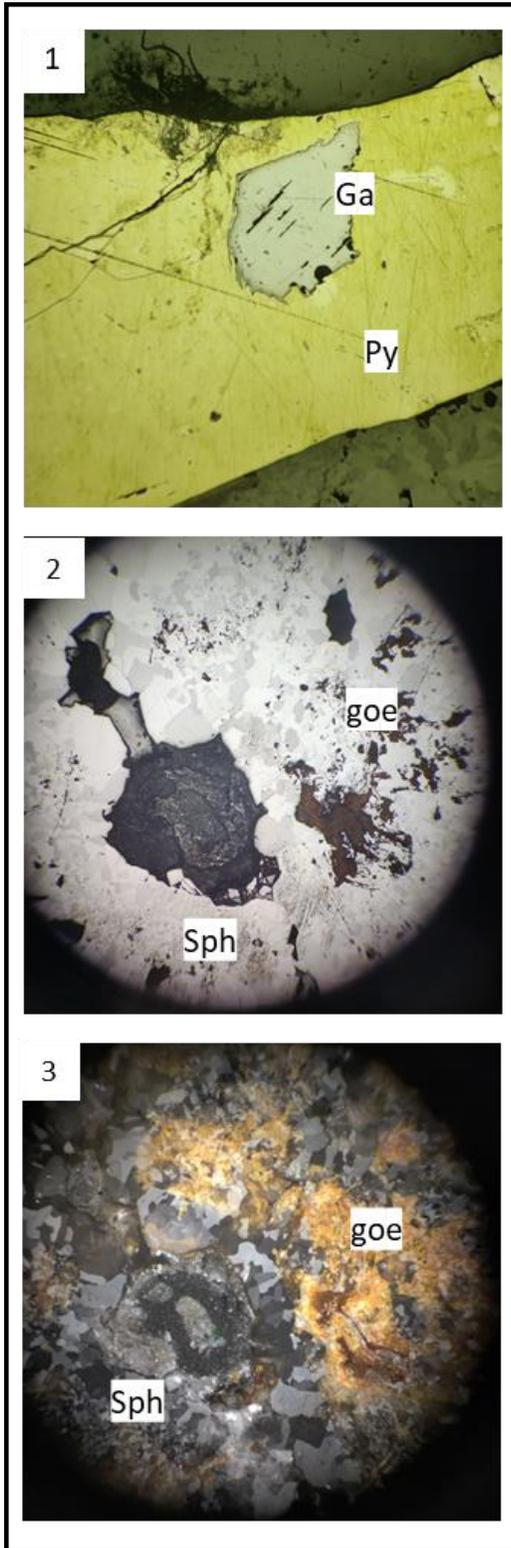
Se observan bordes asimétricos entre la pirita y esfalerita, además de cristales de calcopirita con forma globular diseminada reemplazando la esfalerita y algunos cristales de galena intercreciendo en la pirita.

El orden de cristalización fue esfalerita, pirita, arsenopirita, calcopirita finalizando con galena.

Fotografías: (1) Muestra de los cristales euhedrales de pirita color amarillo altamente alterados a una coloración de arcoíris, con contacto con la matriz de calcita, sin analizador. (2) Cristales de esfalerita que están siendo reemplazados por pequeños cristales de calcopirita diseminados, así como por arsenopirita con una tonalidad amarilla blancuzca, se distingue un mineral transparente (tp) en el centro de la fotografía, sin analizador. (3) Cristales de esfalerita que están siendo reemplazados por pequeños cristales de calcopirita diseminados, así como por pirita en la parte derecha e inferior de la fotografía, sin analizador.

Foto 4.1.11.1. Lámina delgada JM-28.

#### 4.1.12 Muestra JM-29



La muestra de mano consiste en un sulfuro del nivel 3, donde es la transición entre la zona de oxidación y sulfuración. Es una calcita con goethita y pirita con un poco de esfalerita.

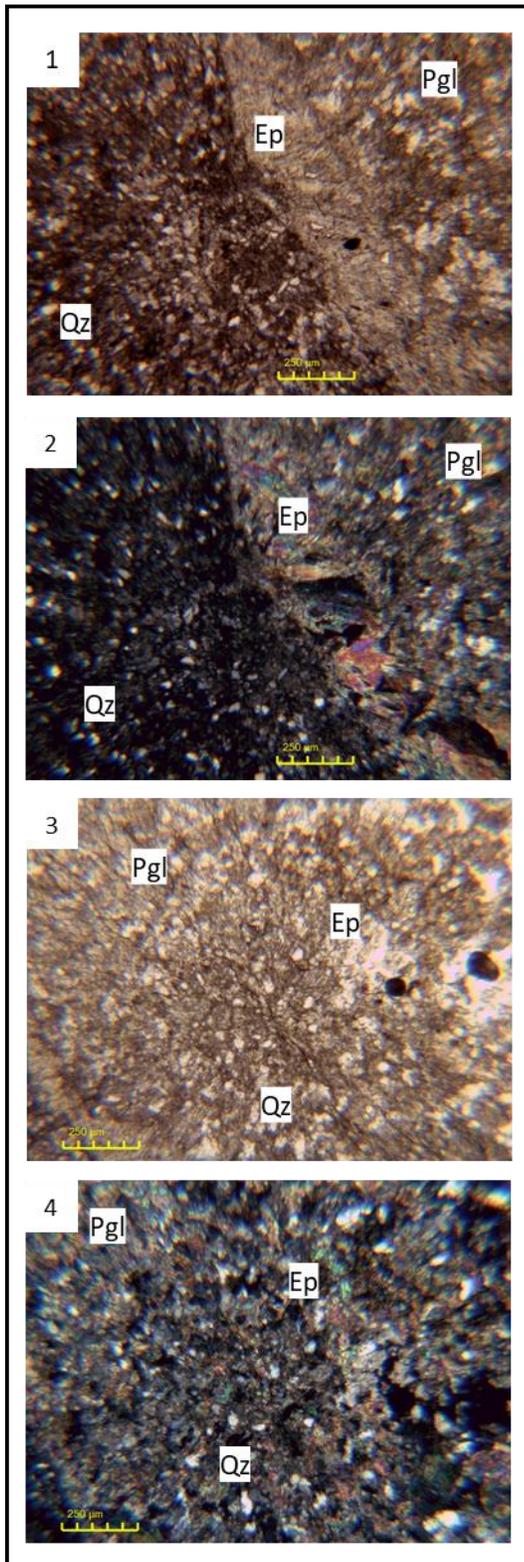
En microscopio se observaron dos zonas, una donde predomina la calcita euhedral con goethita subhedral de color rojo y algunos cristales de esfalerita anhedral.

Mientras en la otra parte se concentran los sulfuros con pirita euhedral que a diferencia de la muestra JM-28 no se presenta alteración de color. Algunos cristales de pirita contienen en su interior galena.

Fotografías: (1) Muestra de un cristal de pirita color amarillo en el que está intercreciendo un cristal subhedral de galena, sin analizador. (2) Cristales de esfalerita color gris, con cristales xenomorfos en el lado derecho de la fotografía, sin analizador. (3) Misma fotografía que la (2) Se nota la coloración anaranjada de la goethita, nicoles cruzados.

Foto 4.1.12.1. Lámina delgada JM-29.

#### 4.1.13 Muestra JM-32



La muestra es de una limolita de color gris al fresco que se puede confundir con caliza, se utilizó ácido clorhídrico y rojo de alizarina para descartar la presencia de carbonatos. Tiene una pátina de epidota de color verde olivo.

En microscopio se observan fragmentos de cristales de cuarzo monocristalino con una forma euhedral y subhedral, con algunos cristales de plagioclasas subhedralas.

Se distingue un contacto entre la lutita y la parte epidotizada de la roca. El límite lo define una serie de cristales tabulares radiales de epidota, a su vez se tienen plagioclasas con una alteración selectiva incipiente de epidota.

No se presentan minerales opacos.

Fotografías: (1) Muestra el contacto de la lutita con la zona alterada a epidota. El contacto consta de cristales aciculares de epidota que separa una zona con pequeños cristales de plagioclase que también se encuentran epidotizados dando una coloración amarilla verdusca, sin analizador. (2) Misma fotografía que la (1) con nicols cruzados se observan colores rosas de tercer orden. (3) Parte alterada a epidota de la muestra, se observan fragmentos de cristales de cuarzo redondeados y algunas plagioclasas, la coloración oscura es producto de la epidotización, sin analizador. (4) Misma fotografía que la (3) Se nota en toda la fotografía los colores de tercer orden producto de la epidota, nicols cruzados.

Foto 4.1.13.1. Lámina delgada JM-32.

#### 4.1.14 Muestra JM-33

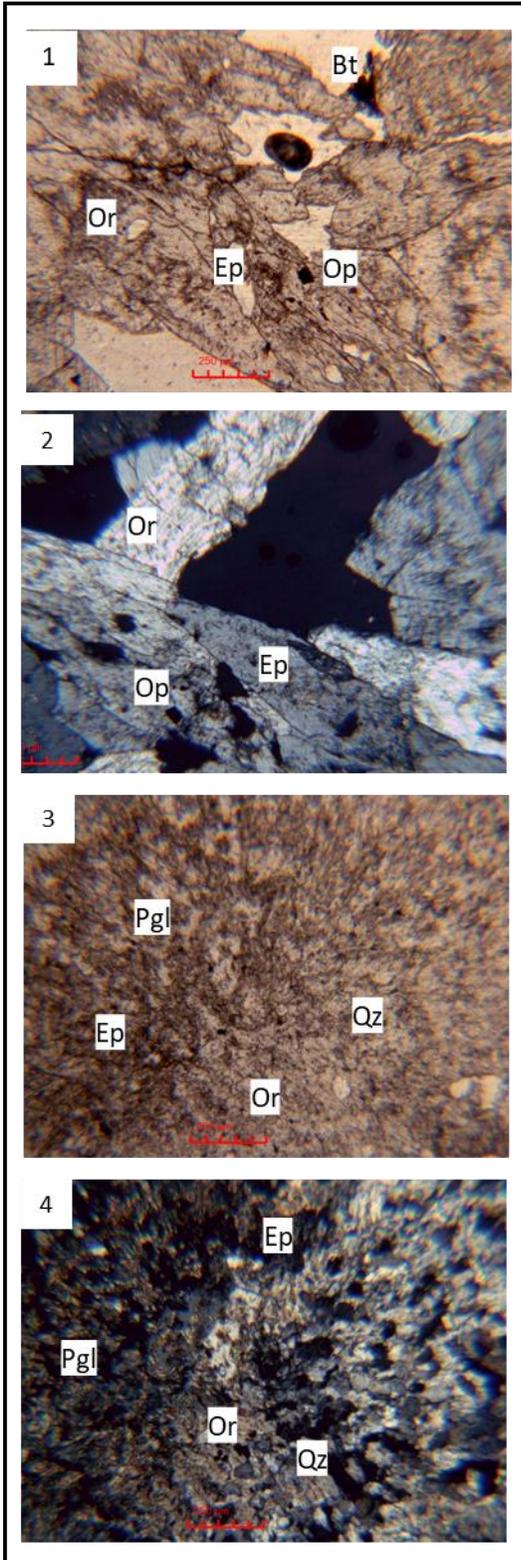


Foto 4.1.14.1. Lámina delgada JM-33.

La muestra corresponde a una lutita con un contacto con roca alterada por hidrotermalismo (propilitización). El color de la lutita es de color gris claro al fresco, mientras que la parte alterada tiene un color verde a rosado.

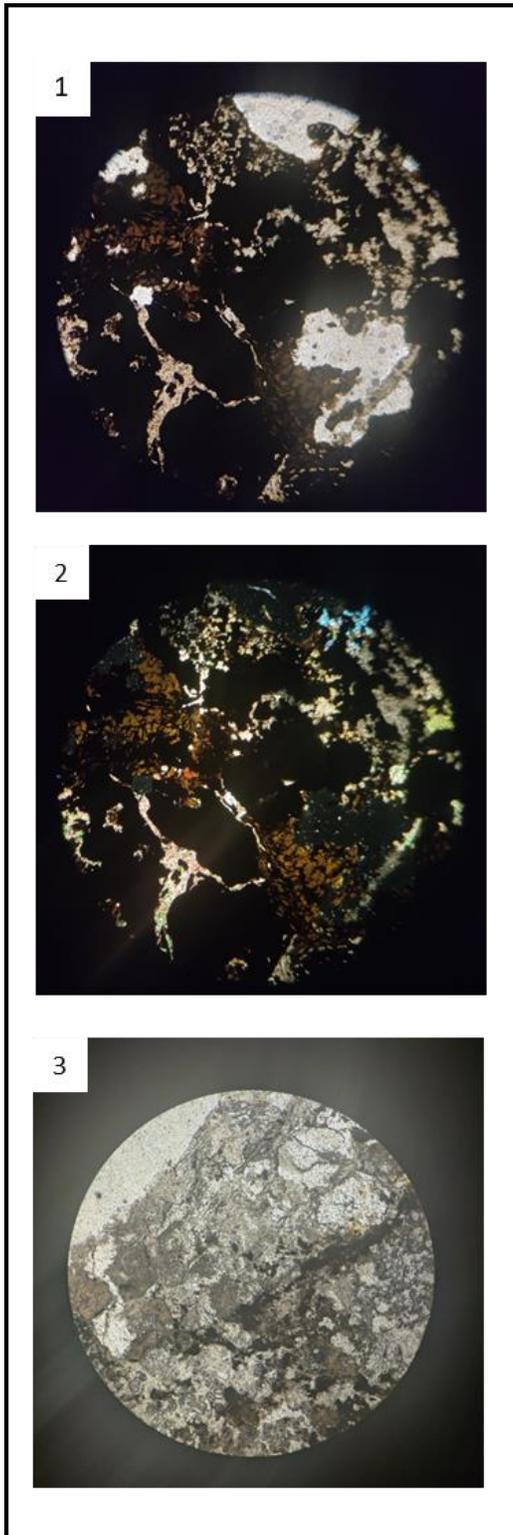
La lutita es muy similar a la muestra JM-25 (ver 4.1.10) y JM-25 (ver 4.1.13), la lámina se puede dividir en varias 4zonas: la primera de estas corresponde a cristales subhedrales de ortoclasa, algunos se encuentran sanos, pero la mayoría tienen cristales intercrecidos de epidota.

En contacto con la zona de cristales de ortoclasa se tiene plagioclasa altamente epidotizada y un poco de sericita, la epidota destaca de la sericita por el relieve mayor, además se observan pocos cristales de cuarzo. La última parte de la muestra que está en contacto con la zona epidotizada se tiene cuarzo euhedral con textura equigranular

Se tienen biotita como mineral accesorio y minerales opacos solo en la zona de los cristales de ortoclasa, representan un 2%.

Fotografías: (1) Cristales euhedrales de ortoclasa con un relieve alto, dentro de algunos cristales la coloración se observa de un color pardo oscuro por la presencia de epidota, sin analizador. (2) Misma fotografía que la (1) con nicoles cruzados a destacar la forma acicular de la epidota dentro de los cristales de ortoclasa. (3) Se observa el contacto un poco difuso en la parte alterada a epidota con la zona de los cuarzos equigranulares, sin analizador. (4) Misma fotografía que la (3) a observar que la parte izquierda la presencia de epidota es notable mientras que la parte derecha está compuesta totalmente por un mosaico de cuarzo.

#### 4.1.15 Muestra JM-42



La muestra corresponde a una calcita con óxidos de manganeso del nivel 1, también se puede distinguir un poco de goethita en la roca.

En el microscopio se observan minerales opacos que corresponden a más del 50%. Los cristales distinguibles son calcita subhedral con óxidos de manganeso y hierro; estos últimos están sobrecreciendo en la calcita.

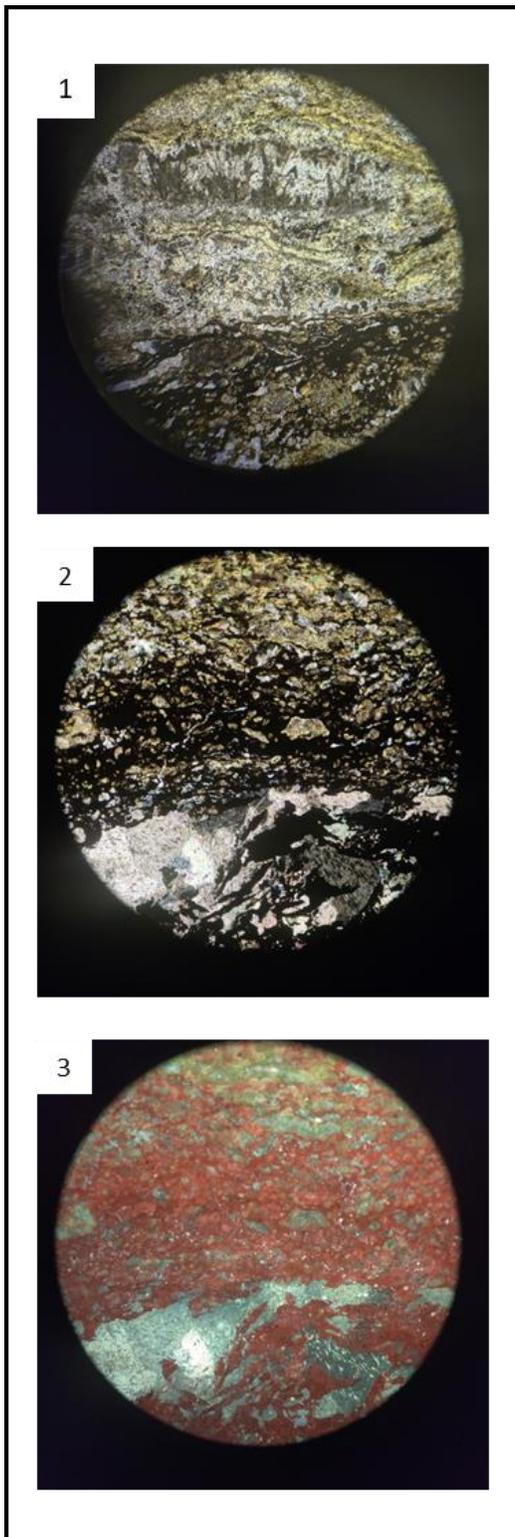
Se tienen algunos cristales de goethita euhedrales esparcidos en la muestra, en una de las bandas por las que está formada la roca se observa siderita euhedral con textura hipidiomórfica.

Los cristales pardo oscuro corresponde a anglesita que está alterando a los minerales opacos.

Fotografías: (1) Cristales opacos que están siendo alterados a anglesita color pardo oscuro, también entre cristales se tiene calcita y siderita, sin analizador. (2) Misma fotografía que la (1) con nicoles cruzados a destacar los colores de birrefringencia de la cerusita. (3) Se observan cristales de siderita de un color pardo claro con un aspecto sucio, con una textura hipidiomórfica, sin analizador.

Foto 4.1.15.1. Lámina delgada JM-42.

#### 4.1.16 Muestra JM-52



La muestra corresponde al gossan que está cercano al pueblo de dinamita entre el intrusivo El Sarnoso y el mármol antes descrito. Cosiste en un horizonte bien definidos de goethita, óxidos de hierro y manganeso.

En microscopio se observan bandas de cristales de calcita euhedrales, con cristales de goethita subhedral. Además, se tiene una banda de pirolusita subhedral con forma radial y siderita xenomorfa alterando a goethita.

Los minerales opacos representan un 40% de la muestra, de los cuales se puede distinguir la esfalerita y goethita.

Se tiene una textura bandeada don una orientación horizontal en la que predomina cierto mineral por cada banda

Fotografías: (1) Bandas de cristales de pirolusita radial, calcita, goethita y siderita, sin analizador. (2) Cristales de goethita acomodadas en bandas con cristales de calcita y siderita color pardo grisáceo, sin analizador. (3) Misma fotografía que la (2) Se nota la coloración rojiza de la goethita, nicoles cruzados.

Foto 4.1.11.1. Lámina delgada JM-52.

## 4.2 Difracción de rayos X.

Se realizó la difracción de rayos X de 3 muestras de difícil identificación, donde las fases minerales mayoritarias se muestran en el difractograma. Los resultados de la DRX se muestran a continuación:

### 4.2.1 Muestra JM-18

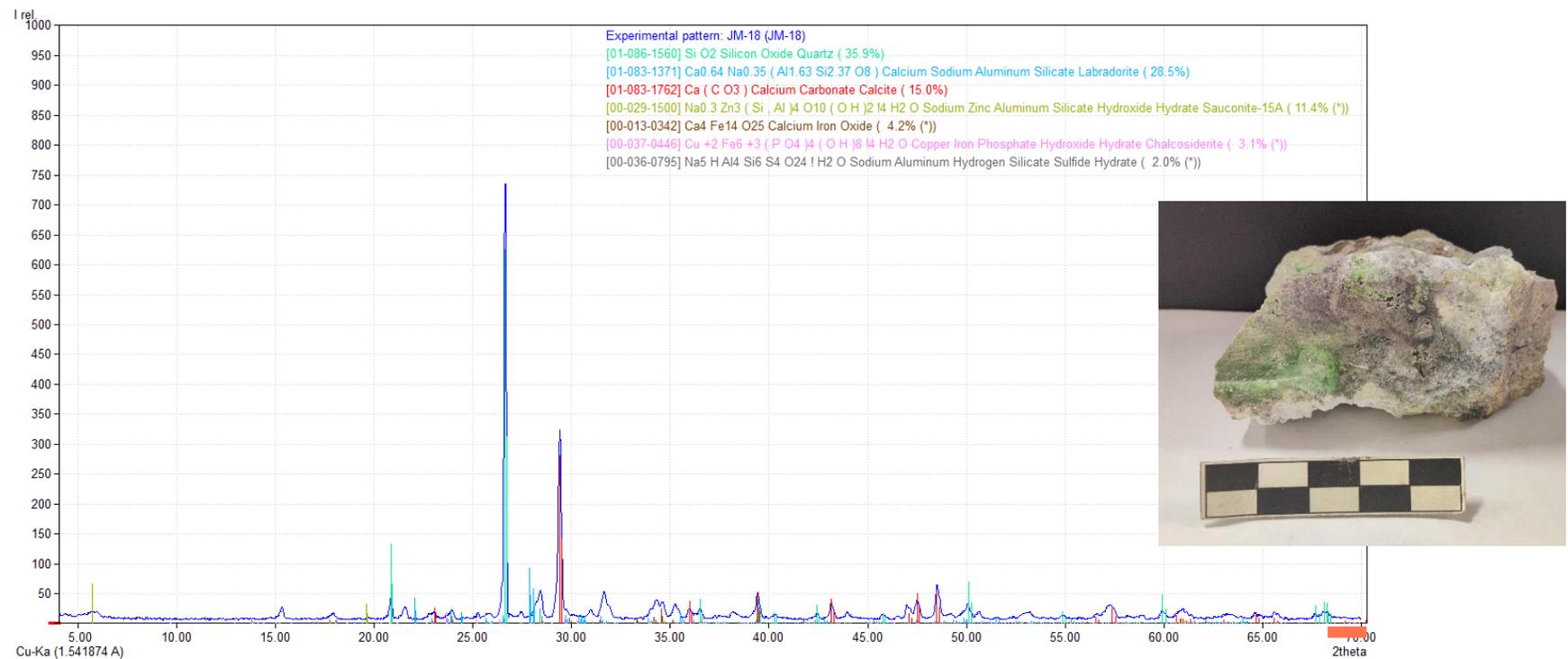


Foto 4.2.1.1. Difractograma y muestra JM-18.

La muestra corresponde a una zona de falla que se encuentra silicificada, la coloración verde es producto de la calcosiderita que en lámina delgada no se pudo describir.

#### 4.2.2 Muestra JM-60

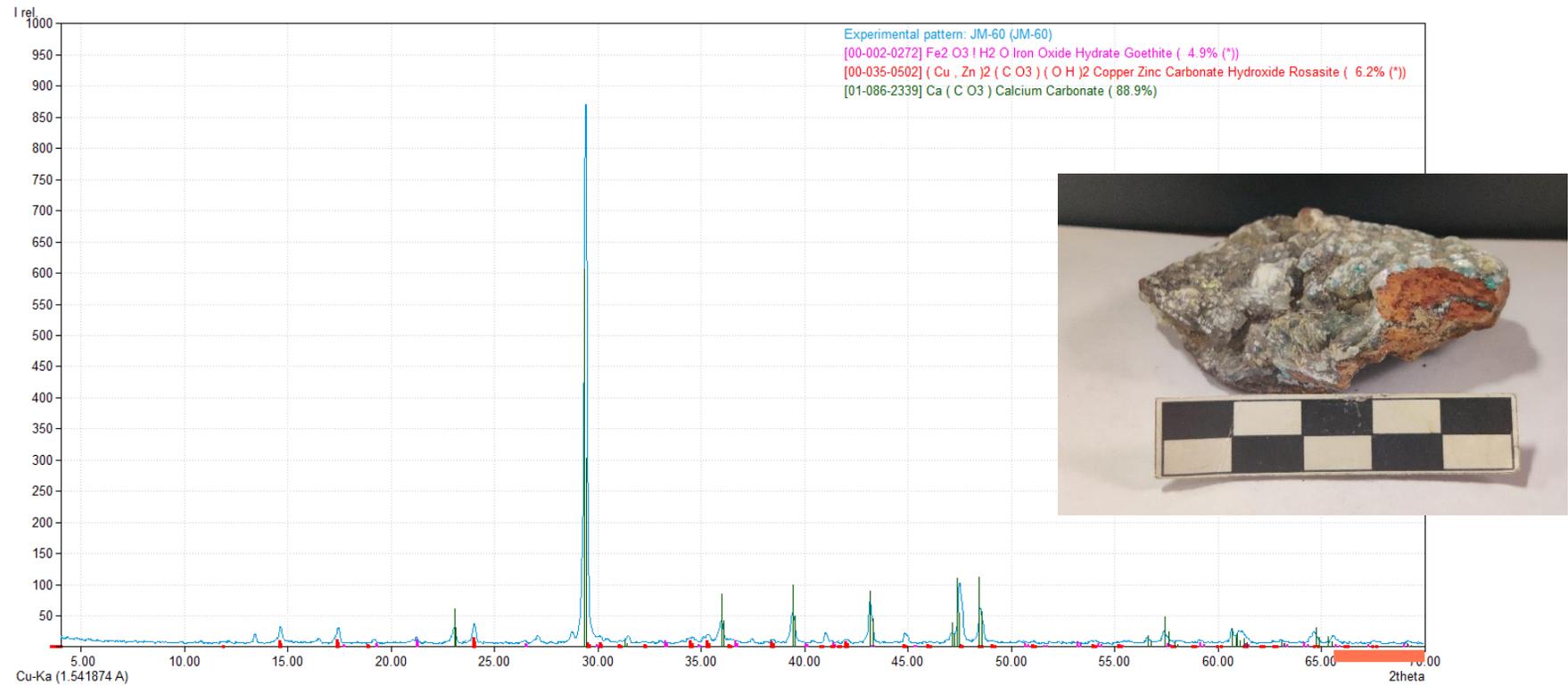


Foto 4.2.2.1. Difractograma y muestra JM-60

Se definió que el cristal de color verde aguamarina es rosasita que están cubiertos por cristales de calcita en una matriz de goethita.

### 4.2.3 Muestra JM-65

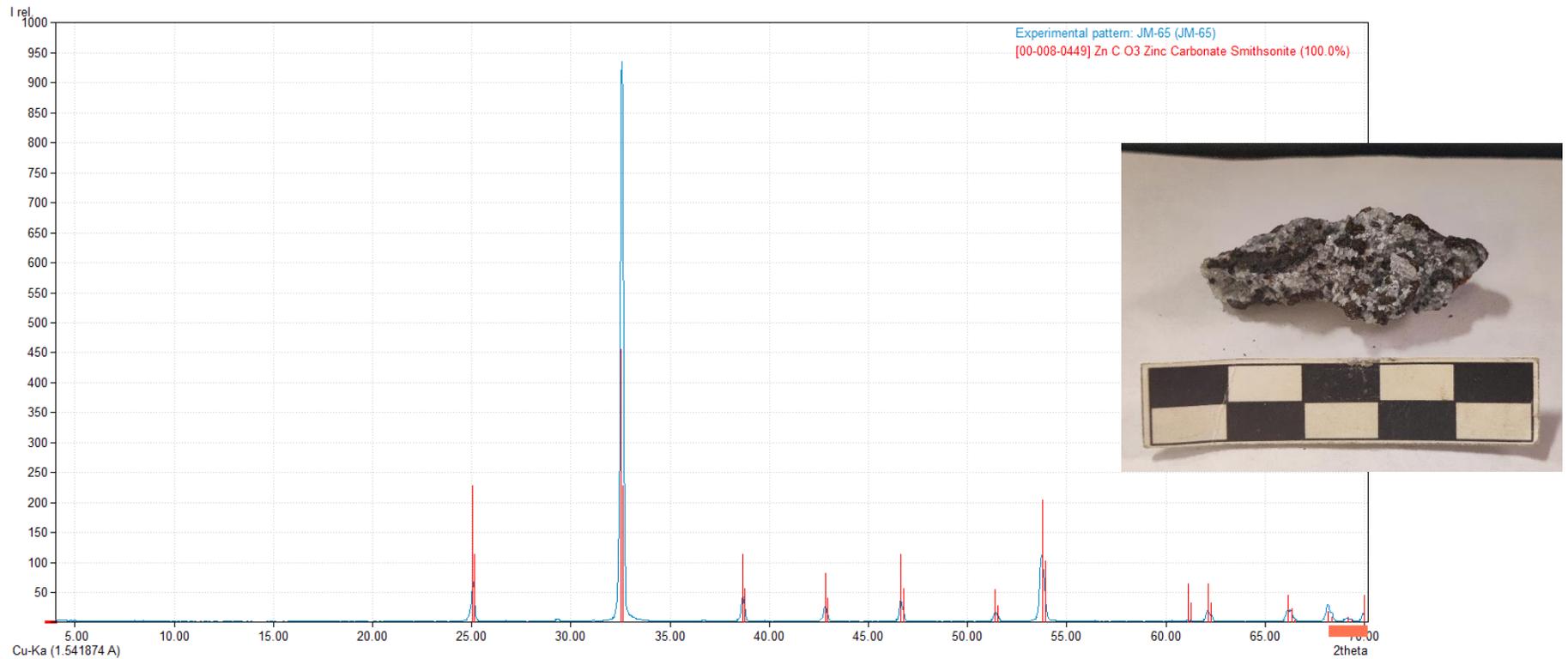


Foto 4.2.1.1. Difractograma y muestra JM-65.

Los valores obtenidos en el análisis de DRX superan al difractograma de una smithsonita encontrada en la base de datos, sin embargo, los datos de la muestra coinciden con dicho difractograma. Por lo que la muestra es una smithsonita.

## 5. Descripción de minerales

El Distrito minero de Mapimí es mundialmente conocido por la riqueza mineralógica. En la zona de estudio se tienen rocas ígneas intrusivas que provocaron la mineralización en las rocas sedimentarias.

Las rocas sedimentarias son la mejor roca para la formación de minerales ya que se pueden generar fácilmente cavidades que propicien el crecimiento de nuevos minerales cuando las soluciones hidrotermales son ácidas y/o por proceso de meteorización con agua de reciente infiltración.

Los minerales formados en un principio fueron los sulfuros por medio de fluidos hidrotermales, una vez depositados y con el paso del tiempo la continua interacción de los sulfuros con el agua meteórica generó una solución ácida rica en zinc, cobre, plomo que favorecieron la precipitación de los arseniatos, así como la formación de zonas oxidadas que se conocen como gossans.

La diversidad mineralógica se debe que la roca encajonante era una caliza fácil de disolver, intrusivos ricos en arsénico, plomo, zinc, cobre, plata y la circulación de agua de reciente infiltración que durante miles de años se volvió cada vez más ácida provocando una mayor disolución formando espacios para que los nuevos minerales pudieran cristalizar.

En la tabla 5.1 se mencionan los minerales encontrados hasta el 2023 en todo el distrito de La Ojuela. Cabe mencionar que para que un mineral este en la lista tiene que cumplir con una cristalización observable a simple vista y una forma definida.

El listado es de 146 minerales diferentes, los minerales que después serán descritos en los siguientes puntos fueron los vistos en la visita a campo.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Nativos	Fórmula	Óxidos	Fórmula	Carbonatos	Fórmula	Vanadatos	Fórmula	Arseniatos	Fórmula
Bismuto	Bi	Psilomelana	$(Ba,H_2O)_2Mn_5O_{10}$	Rosasita	$(Cu,Zn)_2(CO_3)(OH)_2$	Vanadinita	$Pb_5(VO_4)_3Cl$	Arsenodescloizita	$PbZn(AsO_4)(OH)$
Cobre	Cu	Woodruffite	$(Zn,Mn^{2+})Mn_3^{4+}O_7 \cdot 1-2(H_2O)$	Zincrosasita	$(Cu,Zn)_2(CO_3)(OH)_2$	Descloizita	$PbZn(VO_4)(OH)$	Tsumcorita	$PbZn_2(AsO_4)_2 \cdot 2H_2O$
Oro	Au	Cuprita	$Cu_2O$	Auricalcita	$(Zn,Cu)_5(CO_3)_2(OH)_6$	Motramita	$PbCu(VO_4)(OH)$	Adamita	$Zn_2(AsO_4)(OH)$
Plata	Ag	Delafossita	$CuFeO_2$	Ankerita	$Ca(Fe^{2+},Mg)(CO_3)_2$	<b>Molibdatos</b>	<b>Fórmula</b>	Paradamita	$Zn_2(AsO_4)(OH)$
Azufre	S	Tenorita	$CuO$	Aragonita	$CaCO_3$	Ferrimolibdita	$Fe_2(MoO_4)_3 \cdot nH_2O$	Legrandita	$Zn_2(AsO_4)(OH) \cdot H_2O$
<b>Sulfuros</b>	<b>Fórmula</b>	Magnetita	$Fe^{2+}Fe^{3+}_2O_4$	Calcita	$CaCO_3$	Wulfenita	$Pb(MoO_4)$	Mapimita	$Zn_2Fe^{3+}_3(AsO_4)_3(OH)_4 \cdot 10H_2O$
Tetrahedrita	$(Cu,Fe)_{12}Sb_4S_{13}$	Hematita	$Fe_2O_3$	Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	<b>Fosfatos</b>	<b>Fórmula</b>	Kottigita	$Zn_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$
Pirargirita	$Ag_3SbS_3$	Criptomelano	$K(Mn^{4+}_7Mn^{3+})O_{16}$	Malaquita	$Cu_2(CO_3)(OH)_2$	Apatito	$Ca_5(PO_4)_3(Cl/F/OH)$	Metakottigita	$(Zn,Fe,Fe)_3(AsO_4)_2 \cdot 8(H_2O,OH)$
Rejalgar	$As_4S_4$	Housmannita	$Mn_3O_4$	Azurita	$Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$	Collophanita	Variedad apatito	Ojuelaita	$ZnFe^{3+}_2(AsO_4)_2(OH)_2 \cdot 4H_2O$
Bismutina	$Bi_2S_3$	Ramsdellita	$MnO_2$	Siderita	$FeCO_3$	Whitlockita	$Ca_9Mg(PO_4)_6(PO_3OH)$	<b>Silicatos</b>	<b>Fórmula</b>
Tennantita	$Cu_{12}As_4S_{13}$	Pirolusita	$MnO_2$	Rodocrosita	$MnCO_3$	Crandallita	$CaAl_3(PO_4)(PO_3OH)(OH)_6$	Crisocola	$(Cu,Al)_4H_4(OH)_8Si_4O_{10} \cdot nH_2O$
Estannita	$Cu_2FeSnS_4$	Molibdita	$MoO_3$	Cerusita	$PbCO_3$	Libethenite	$Cu_2PO_4(OH)$	Caolinita	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$
Calcocita	$Cu_2S$	Bindheimita	$Pb_2Sb_2O_6O$	Hidrocincita	$Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$	Piromorfita	$Pb_5(PO_4)_3Cl$	Diópsido	$CaMgSi_2O_6$
Enargita	$Cu_3AsS_4$	Minio	$Pb_3O_4$	Smithsonita	$ZnCO_3$	<b>Arseniatos</b>	<b>Fórmula</b>	Braunita	$Mn^{2+}Mn^{3+}_6(SiO_4)_8O_8$
Bornita	$Cu_5FeS_4$	Litargirio	$PbO$	<b>Sulfatos</b>	<b>Fórmula</b>	Villyaellenita	$(Mn^{2+}, Ca, Zn)_5(AsO_4)_2(AsO_3OH)_2 \cdot 4H_2O$	Sauconita	$Na_{0.3}Zn_3((Si,Al)_4O_{10})(OH)_2 \cdot 4H_2O$
Emplectita	$CuBiS_2$	Scrutinyita	$\alpha-PbO_2$	Schulenbergita	$(Cu,Zn)_7(SO_4)_2(OH)_{10} \cdot 3H_2O$	Dussertita	$BaFe^{3+}_3(AsO_4)(AsO_3OH)(OH)_6$	Cuarzo	$SiO_2$
Calcopirita	$CuFeS_2$	Plattnerita	$PbO_2$	Barita	$BaSO_4$	Arsenosiderita	$Ca_2Fe^{3+}_3(AsO_4)_3O_2 \cdot 3H_2O$	Hemimorfita	$Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$
Covellina	$CuS$	Valentinita	$Sb_2O_3$	Serpierita	$Ca(Cu,Zn)_4(SO_4)_2(OH)_6 \cdot 3H_2O$	Ogdensburgita	$Ca_2Fe^{3+}_4(Zn,Mn^{2+})(AsO_4)_4(OH)_6 \cdot 6H_2O$		
Pirrotita	$Fe_{1-x}S$	Estibiconita	$Sb^{3+}Sb^{5+}_2O_6(OH)$	Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Hedifana	$Ca_2Pb_3(AsO_4)_3Cl$		
Arsenopirita	$FeAsS$	Casiterita	$SnO_2$	Brochantita	$Cu_4(SO_4)(OH)_6$	Conicalcita	$CaCu(AsO_4)(OH)$		
Marcasita	$FeS_2$	<b>Hidróxidos</b>	<b>Fórmula</b>	Calcantita	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	Sewardita	$CaFe^{3+}_2(AsO_4)_2(OH)_2$		
Pirita	$FeS_2$	Lepidocrocita	$FeO(OH)$	Melanterita	$Fe^{2+}(H_2O)_6SO_4 \cdot H_2O$	Manganlotharmeyerita	$CaMn^{3+}_2(AsO_4)_2(OH)_2$		
Molibdenita	$MoS_2$	Goethita	$FeO(OH)$	Copiapita	$Fe^{2+}Fe^{3+}_4(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$	Austinita	$CaZn(AsO_4)(OH)$		
Jamesonita	$Pb_4FeSb_6S_{14}$	Manganita	$Mn(OH)$	Halotrichita	$FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	Lotharmeyerita	$CaZn_2(AsO_4)_2 \cdot 2H_2O$		
Boulangerita	$Pb_5Sb_4S_{11}$	Feitknechtita	$Mn^{3+}O(OH)$	Jarosita	$KFe^{3+}_3(SO_4)_2(OH)_6$	Chenevexita	$Cu_2Fe^{3+}_2(AsO_4)_2(OH)_4$		
Galena	$PbS$	Groutita	$MnO$	Pickeringita	$MgAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	Bayldonita	$Cu_3PbO(AsO_3OH)_2(OH)_2$		
Estibina	$Sb_2S_3$	Calcofanita	$ZnMn^{4+}_3O_7 \cdot 3H_2O$	Hexahydrita	$MgSO_4 \cdot 6H_2O$	Parasimplesita	$Fe^{2+}_3(AsO_4)_2 \cdot 8(H_2O)$		
Esfalerita	$ZnS$	Hidrohousmannita		Epsomita	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Escorodita	$Fe^{3+}AsO_4 \cdot 2H_2O$		
<b>Seleniuro</b>	<b>Fórmula</b>	Hydrohetaerolita		Plumbojarosita	$Pb_{0.5}Fe^{3+}_3(SO_4)_2(OH)_6$	Miguelromeroita	$Mn_5(AsO_4)_2(HAsO_4)_2 \cdot 4H_2O$		
Berzelianita	$Cu_2Se$	<b>Haluros</b>	<b>Fórmula</b>	Anglesita	$PbSO_4$	Mimetita	$Pb_5(AsO_4)_3Cl$		
Umangita	$Cu_3Se_2$	Cerargirita	$AgCl$	Celestita	$SrSO_4$	Duftita	$PbCu(AsO_4)(OH)$		
Clausthalita	$PbSe$	Fluorita	$CaF_2$	Bianchita	$Zn(SO_4) \cdot 6H_2O$	Segnitita	$PbFe^{3+}_3AsO_4(AsO_3OH)(OH)_6$		
		Nantokita	$CuCl$	Goslarita	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	Carminita	$PbFe^{3+}_2(AsO_4)_2(OH)_2$		
		Murdoquita	$PbCu_6O_{8-x}(Cl,Br)_{2x}$			Beudantita	$PbFe^{3+}_3(AsO_4)(SO_4)(OH)_6$		

Tabla 5.1. Minerales encontrados en el distrito minero "La Ojuela" hasta 2023.

## 5.1 Nativos.

### 5.1.1 Cobre Cu

Se han encontrado cristales de hasta 6 mm en La Ojuela (Panczner, 1987) en (Moore, 2003). Los cristales suelen ser subhedrales y se presentan en finos hilos. Se altera a malaquita y cuprita. (Hoffman, 1968)

El cobre nativo se encuentra en los niveles superiores en la zona de oxidación donde el ambiente es reductor asociado a cuprita, delafossita y goethita. (Hoffman, 1968)

### 5.1.2 Plata

Se presenta en forma de hilos de plata nativa en la zona de San Juan Poniente que corresponde a los niveles tres y cuatro que pertenecen a la zona de oxidación (Panczner, 1987) en (Moore, 2003).

Se encuentra asociada a cerusita, anglesita y mimetita (Hoffman, 1968), así mismo, Hoffman menciona que la plata en ocasiones se encuentra reemplazada por lo que parece ser clorargirita.

### 5.1.3 Oro Ag

Se han encontrado pequeños cristales de oro en la zona superior de la mina que corresponde a la zona oxidada de enriquecimiento supergénico (Hoffman, 1968) muestreos en la zona oxidada han dado una ley de hasta 5 gr/ton (García Padilla & Millán Quezada, 2004).

Está asociado exclusivamente con hematita, goethita y óxidos de manganeso, mientras que en la zona de sulfuros se encuentra con pirita (Hoffman, 1968).

## 5.2 Sulfuros.

### 5.2.1 Enargita $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$

La enargita es uno de los primeros sulfuros constituyentes. Es uno de los minerales de mena de cobre (Hoffman, 1968).

Se encuentra en los niveles más profundos que corresponden a la zona de sulfuración, se encuentra asociado a arsenopirita, pirrotita, galena y calcopirita. (Hoffman, 1968).

A pesar de ser un constituyente en la zona de sulfuros, no se tiene conocimiento de cristales mayores a 10 mm de enargita. (Hoffman, 1968) en (Moore, 2003).

*Foto 5.2.2.1. Mindat. (2014). Enargita con esfalerita de La Ojuela, Mapimí, Durango. "Catellanos collection" [Foto]. Recuperado de <https://www.mindat.org/photo-654568.html>*



### 5.2.2 Calcopirita $\text{CuFeS}_2$



La calcopirita es la principal mena de cobre en el distrito minero. Se encuentra en los niveles inferiores en la zona de sulfuración; con mayor presencia en las zonas lejanas al contacto con la roca encajonante, mientras que una existencia casi nula donde el plomo domina (Hoffman, 1968).

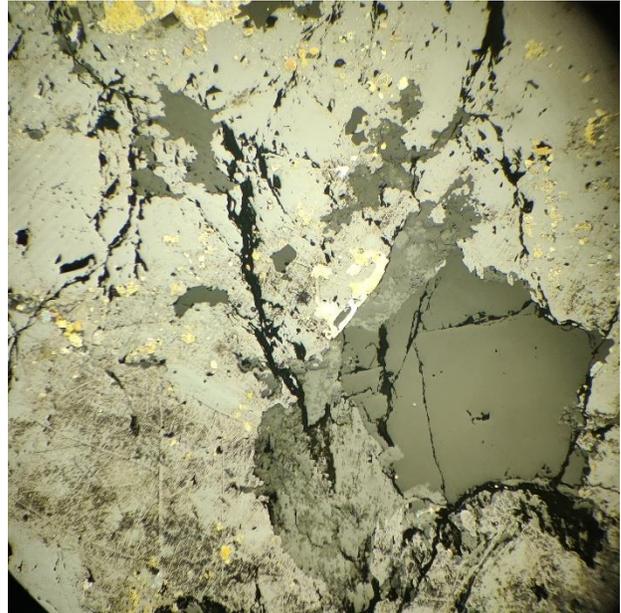
Se halla asociado a arsenopirita, pirita, galena, esfalerita, enargita y marcasita. Se encuentra en forma masiva, no se han encontrado cristales de buena calidad del mineral (Hoffman, 1968).

*Foto 5.2.2.1. Calcopirita, bornita, pirita colección privada "Philips Collection".*

### 5.2.3 Arsenopirita FeAsS

La arsenopirita es el mineral principal de arsénico en la mina y en el intrusivo El Sarnoso. Se han encontrado cristales euhedrales de 1 cm. Ubicado en los niveles inferiores, en la zona de sulfuración, es muy común encontrar los cristales en vertederos de dichos niveles (Hoffman, 1968).

Está asociado a esfalerita, galena y pirita. La arsenopirita es la fuente del As, por lo que es el principal mineral formador de arseniatos en la zona por su alteración con aguas meteóricas (Hoffman, 1968).



*Foto 5.2.3.1. Arsenopirita color amarillo blancuzco dentro de esfalerita en superficie pulida JM-28.*

### 5.2.4 Pirita FeS<sub>2</sub>



La pirita se encuentra ampliamente distribuida en la zona, en los niveles inferiores de la mina correspondiente a los sulfuros y en el intrusivo El Sarnoso.

Los cristales tienen una forma piritoédrica en su mayoría, sin embargo, también se encuentran cubos y octaedros (Moore, 2003). La pirita en ocasiones es reemplazada por esfalerita, galena y calcopirita (Hoffman, 1968).

(Hoffman, 1968) propone que la pirita disminuye en cantidad y la arsenopirita aumenta mientras más cercano a la mineralización de sulfuros se encuentre.

*Foto 5.2.4.1. Pirita piritoédrica y cúbica de Mapimí, Durango. Colección privada.*

### 5.2.5 Galena PbS

La galena es la principal mena de plomo en La Ojuela. La manera en cómo la galena se fractura tiende a ser en forma de ojuelas, dando así el nombre de la mina (Villarillo, 1909) en (Moore, 2003)

La galena se encuentra principalmente en los niveles profundos donde los sulfuros no han sido alterados, sin embargo, se pueden encontrar cristales en la zona de transición entre sulfuros y óxidos.

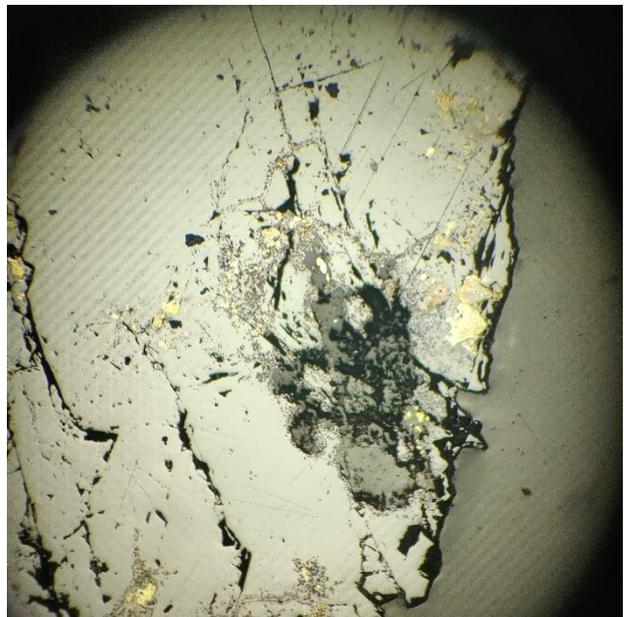
Los cristales de galena son cúbicos de hasta 2 cm, la muestra obtenida en campo corresponde al nivel tres (transición de sulfuros a óxidos) y está asociada a cuarzo, pirita, arsenopirita, calcopirita y esfalerita.

En la zona oxidada la galena se encuentra asociada a plumbojarosita, goethita, mimetita, wulfenita y bindeimita (Hoffman, 1968).

(Hoffman, 1968) muestreó la galena a diferentes profundidades, llegando a la conclusión que el contenido de plata disminuye mientras más lejano de la chimenea o manto se encuentre.

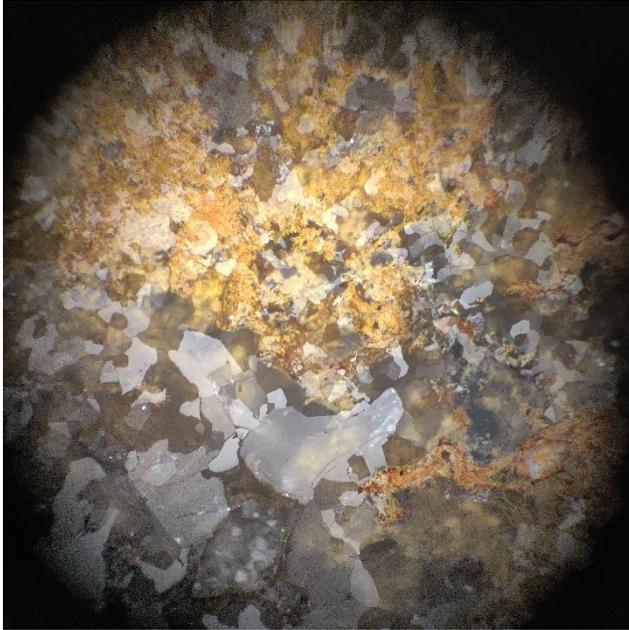


*Foto 5.2.5.1. Muestra tomada en el nivel tres. Galena cúbica con cristales de cuarzo.*



*Foto 5.2.5.2. Superficie pulida de la muestra JM-28, se observan los cristales de galena con pirita intercrecida.*

### 5.2.6 Esfalerita ZnS



La esfalerita es un mineral muy común en el distrito minero, se encuentra distribuido principalmente en la zona de sulfuración, sin embargo, se puede observar también en la zona de oxidación.

Se obtuvieron muestra de campo, de un color pardo oscuro a negro, en forma masiva. El ejemplar de la zona de sulfuros se encuentra asociada a pirita, arsenopirita, calcopirita y cuarzo.

*Foto 5.2.6.1. Superficie pulida de la muestra JM-29, se observan los cristales de esfalerita con pirita y arsenopirita.*

La alteración de la esfalerita provee del zinc necesario para los diferentes arseniatos de zinc, así como para la formación de hemimorfita y smithsonita (Hoffman, 1968)



*Foto 5.2.6.2. Esfalerita masiva de color pardo-negruzco con cristales cúbicos de pirita y fluorita de Mapimí, Durango. Colección privada.*

## 5.3 Óxidos e hidróxidos.

### 5.3.1 Hematita $\text{Fe}_2\text{O}_3$



La hematita junto con la goethita y limonita se encuentran como matriz de varios de los minerales de Mapimí.

Los cristales de hematita son escasos y fueron encontrados en el gossan cercano a Dinamita, entre el contacto del intrusivo El Sarnoso con la caliza; se observaron bandas ricas en óxidos de hierro que incluía la hematita.

Está asociada a calcita, criptomelano, pirolusita, cuprita, delafossita y covelita (Hoffman, 1968).

*Foto 5.3.1.1. Matriz de hematita, goethita y limonita de la muestra 5201 "Colección geográfica" exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.*

### 5.3.2 Criptomelano $\text{K}(\text{Mn}^{4+}_7 \text{Mn}^{3+})\text{O}_{16}$

El criptomelano se encuentran en la zona de óxidos. Es de un color grisáceo a plateado con un hábito botroidal.

La muestra recolectada corresponde al nivel cuatro que es la parte oxidada del yacimiento. Está asociado a austinita, adamita, goethita, pirolusita y limonita.

En el estudio de (Hoffman, 1968) se describe que las mayores concentraciones de criptomelano están al oeste del intrusivo El Sarnoso.



*Foto 5.3.2.1. Muestra tomada en el nivel cuatro. Matriz de goethita con criptomelano.*

### 5.3.3 Pirolusita $MnO_2$



La pirolusita hallada en la mina de La Ojuela se ubica en los niveles superiores donde la oxidación es mayor.

Está asociada a criptomelano, manganita, goethita; en el ejemplar obtenido también se observa calcita hojosa.

La pirolusita es producto de la alteración de criptomelano (Hoffman, 1968).

*Foto 5.3.3.1. Pirolusita con cristales de calcita, muestra tomada en el nivel cero.*

### 5.3.4 Plattnerita $PbO_2$

La plattnerita se encuentra en las zonas oxidadas donde se presentan las menas de plomo (galena) (Hoffman, 1968).

Los especímenes están en una matriz de limonita se observan cristales tetragonales bien formados de color pardo con lustre semimetálico.

Se asocia a hemimorfita, goethita, calcita, limonita, pirolusita, (Hoffman, 1968) encontró que se puede encontrar con auricalcita, rosasita, hidrocincita y murdoquita.



*Foto 5.3.4.1. Plattnerita en matriz de limonita (3288) "Colección geográfica" exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.*

### 5.3.5 Goethita FeO(OH)



*Foto 5.3.5.1. Matriz de goethita de cristales de calcita rosada. Muestra del nivel 1.*

La goethita es el óxido más común en el distrito minero de La Ojuela, siendo el principal constituyente de la matriz donde diferentes minerales cristalizan.

Se forma a partir de la alteración de sulfuros como es: pirita, arsenopirita, marcasita y pirrotita. (Hoffman, 1968). La goethita profundiza hasta los niveles más profundos, sin embargo, su presencia mayor es en los niveles superiores donde se encuentran los óxidos.

Se presenta como matriz y en forma botroidal con colores desde un rojizo intenso hasta un rojizo grisáceo. Se han observado pseudomorfos de goethita pirita y algunos con arsenopirita (Hoffman, 1968).

El gossan ubicado entre el intrusivo granodiorítico El Sarnoso y la Fm. Aurora forma varias capas horizontales intercaladas con hematita, pirolusita y calcita.

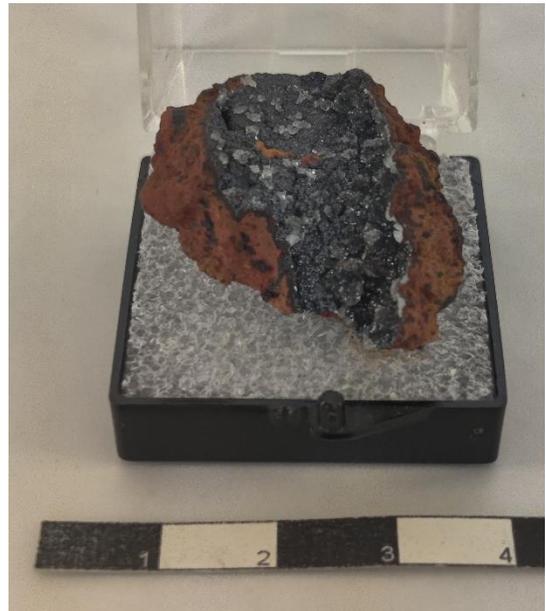


*Foto 5.2.5.2. Muestra del gossan (3.1.3) en el que se observan bandas de goethita intercaladas con hematita, óxidos de manganeso y calcita.*

### 5.3.6 Calcofanita $\text{ZnMn}^{4+}_3\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

La calcofanita es un mineral producto del enriquecimiento supergénico y se encuentra en la zona de óxidos. De un color grisáceo oscuro con habito botroidal y estalactítico.

En el estudio de (Hoffman, 1968) se asocia el mineral con adamita, smithsonita y calcita



*Foto 5.3.6.1. Calcofanita en matriz de goethita (2378) "Colección geográfica" exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.*

## 5.4 Haluros.

### 5.4.1 Fluorita $\text{CaF}_2$



*Foto 5.4.1.1. Fluorita cubica morada translucida en matriz de limonita-goethita.*

La fluorita es común en el distrito minero. Los colores van desde un morado claro, rosa, verde y café. El sistema cristalino es el cubico siendo los cristales octaédricos {111} los más comunes, sin embargo, se pueden encontrar cristales dodecaedricos {110} (Hoffman, 1968)

Las muestras obtenidas en nuestra excursión son de un color morado claro translucido y tienen una fluorescencia baja de color rosado. Se observan cristales cúbicos entre crecidos entre sí.

La fluorita se asocia a eventos hidrotermales. Es un mineral secundario en el área de estudio donde las mayores concentraciones son en los niveles superiores, tiene varias asociaciones mineralógicas pero las más comunes son con calcita, barita, wulfenita y hemimorfita.



*Foto 5.4.1.2. Fluorita morada con cristales de barita.*

## 5.5 Carbonatos.

### 5.5.1 Rosasita $(\text{Cu,Zn})_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$



La rosasita es un mineral producto del enriquecimiento supergénico, que se encuentra en los niveles superiores.

Se encuentra en una matriz de limonita, los cristales son de un color verde aqua con un hábito botroidal.

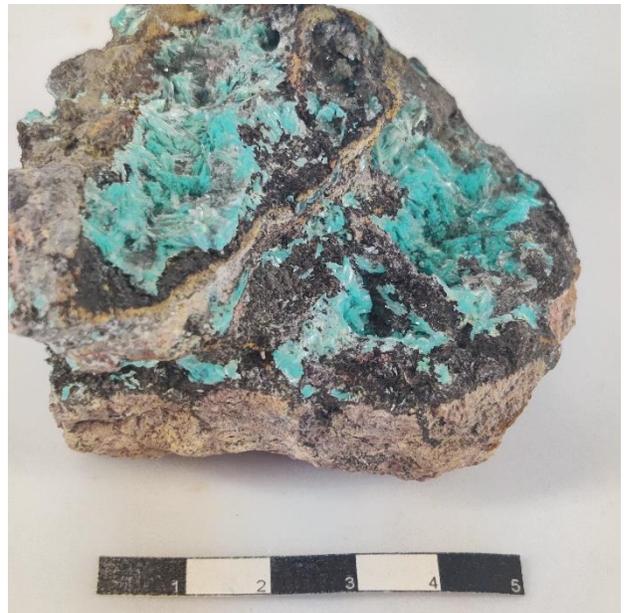
Está asociado a calcita, goethita, limonita, hemimorfita y malaquita.

*Foto 5.5.1.1. Rosasita en matriz de limonita (3277)  
"Colección geográfica" exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.*

### 5.5.2 Auricalcita $(\text{Zn,Cu})_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$

La auricalcita se encuentra en la parte superior del yacimiento, formado por la meteorización de sulfuros de zinc; se cristaliza como carbonato (Hoffman, 1968).

Es de un color turquesa pálido a un turquesa vivo, con un hábito acicular radial. La coloración dependerá del contenido de cobre, mientras más intenso sea la tonalidad turquesa más cobre contiene en su estructura (Jones, 1971) en (Moore, 2003).



*Foto 5.4.2.2.. Auricalcita (581) "Colección geográfica" exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.*

Está asociado a calcita, smithsonita, malaquita, azurita y cerusita

En la mina de La Ojuela se encuentran ejemplares de muy buena calidad apreciados por los mineralogistas. Los mejores ejemplares fueron encontrados en la década de los años 50s y 60s, en la actualidad es un mineral raro de encontrar (Moore, 2003).

*Foto 5.4.2.2. Auricalcita con fluorita "Smithsonian Institution specimen", WA D.C, USA. Wendell Wilson Recuperado de (Moore, 2003).*



### 5.5.3 Aragonita $\text{CaCO}_3$

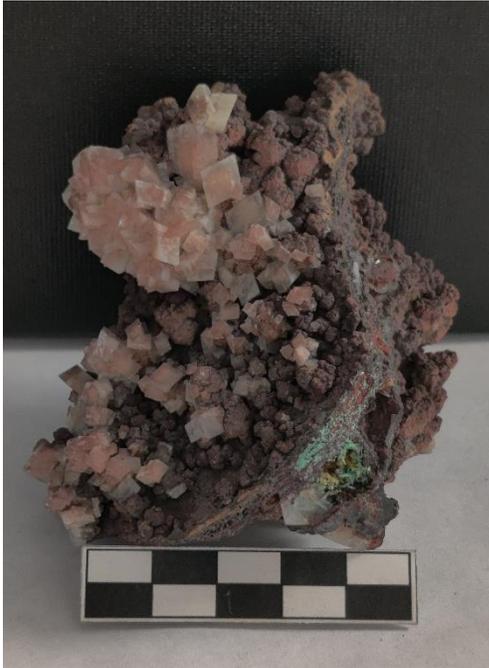
La aragonita se encuentra en fracturas rellenando las calizas y dolomitas fracturadas, (Hoffman, 1968) observó blancas estalctitas de este mineral.

Es producto de la meteorización de las calizas y dolomitas de la mina, de un color blanco a traslúcido y están asociado a goethita, calcita y limonita. Los mejores especímenes han sido encontrados en el nivel 7 con cristales tabulares traslúcidos de 30 cm de largo (Moore, 2003).



*Foto 5.5.3.1. Cristales de aragonito color blanco, colección privada.*

### 5.5.4 Calcita $\text{CaCO}_3$



La calcita es el mineral más común en el distrito minero de Mapimí. Existe una gran variedad de tonalidades de colores desde blanco, rosa, verdusco y gris. Los cristales que se observan son euhedrales romboédricos {1011} (Hoffman, 1968).

La formación de los cristales de calcita son la última parte de la paragénesis del yacimiento, sin embargo (Hoffman, 1968) propone que la plattnerita, descloizita y hemimorfita pueden ser posteriores a este mineral.

*Foto 5.5.4.1. Cristales romboédricos de calcita de una tonalidad rosada por la presencia de óxidos de hierro. Muestra del nivel 1*

La calcita se asocia a las últimas etapas de hidrotermalismo, así como a la precipitación del carbonato de calcio de las calizas que predominan en la zona. Al ser un mineral muy común en el área de estudio las asociaciones mineralógicas son muy variables. En las muestras obtenidas en la visita de campo la calcita que se observó es de color rosado; se encuentra asociado a goethita, malaquita y jarosita.



*Foto 5.5.4.1. Calcita hojosa blanca en una matriz de goethita, asociada a malaquita. Muestra del nivel 2*

### 5.5.5 Malaquita $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$



*Foto 5.5.5.1. Malaquita (5895) "Colección geográfica" exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.*

La malaquita es un mineral muy común en la parte superior del distrito que corresponde a la zona de oxidación (Hoffman, 1968).

La muestra obtenida se encuentra en una matriz de limonita-goethita, la malaquita tiene un hábito acicular con un verde muy intenso. Generalmente se encuentra asociado a goethita, calcita, azurita, auricalcita, rosasita, hemimorfita y crisocola.

La malaquita en ocasiones se puede encontrar como pseudomorfo de la azurita.

Como se encontró en 1999 cristales pseudomorfos en la chimenea de San Juan Poniente. (Moore, 2003).

### 5.5.6 Azurita $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$

La azurita es de un color azul oscuro intenso con un lustre adamantino. Se encontró en el nivel 0 asociado a calcita y malaquita, sin embargo, también se encuentra asociado a yeso y malaquita, así como en zonas de falla (Hoffman, 1968).

Se encuentra en la zona de oxidación, sin embargo, es difícil encontrarla por debajo del nivel 2. Los mejores especímenes se han encontrado en San Juan Poniente con cristales hasta de 3 cm (Moore, 2003).



*Foto 5.5.6.1. Azurita en calcita encontrada en el nivel 0.*

### 5.5.7 Siderita $\text{FeCO}_3$



La siderita se encuentra cercano a las vetas que se encuentran en explotación. (Hoffman, 1968).

Tiene un color beige-crema y se presenta en forma masiva y en algunos casos tabular con un lustre sedoso.

Se encuentra asociado a calcita estibinita, galena y goethita (Hoffman, 1968), además existen

*Foto 5.5.7.1. Cristales de siderita e color beige colección privada.*

La cerusita generalmente es producto de la alteración de la anglesita y galena, en las zonas oxidadas donde se tiene el enriquecimiento supergénico (Hoffman, 1968).

Además (Hoffman, 1968) propone que la mayoría de la cerusita se encuentra rodeando la anglesita que a su vez se torna en la galena masiva. Mientras que algunos cristales se encuentran maclados con un tamaño de hasta 2 cm (Panczner, 1987) en (Moore, 2003).

Los cristales de cerusita en la zona oxidada están asociados a goethita, calcita wulfenita y mimetita (Hoffman, 1968).

### 5.5.8 Cerusita $\text{PbCO}_3$



*Foto 5.5.8.1. Hargis, P. (sf). Cerusita con goethita de La Ojuela, Mapimí, Dgo. [Foto]. Recuperado de <https://www.mindat.org/photo-406464.html>*

### 5.5.9 Hidrocincita $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$



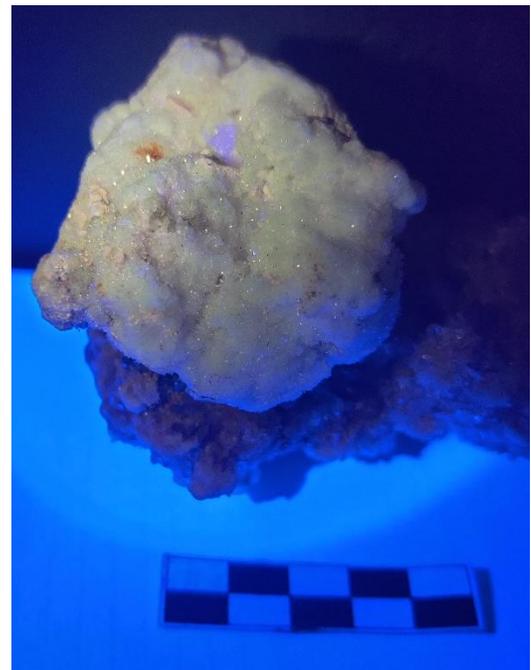
*Foto 5.4.9.1. Hidrocincita con plattnerita en matriz de goethita (5027) "Colección geográfica" exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.*

La hidrocincita se forma en la zona oxidada producto de la auricalcita y la plattnerita (Hoffman, 1968). Por mucho que la fórmula de la auricalcita es la misma con excepción del Cu por el Zn que se tiene en la hidrocincita no se forma una serie sólida (Jamber & Puliot, 1965) en (Moore, 2003)

De color blanco brillante con un lustre nacarado forma botroidal, sin embargo, también se tienen cristales aciculares

Se encuentra asociado a su vez con plattnerita, calcita y hemimorfita, este último usualmente cristaliza al mismo tiempo que la hidrocincita (Hoffman, 1968).

En la década de los 60s era un mineral fácil de encontrar, no obstante, en la actualidad es un mineral raro. Es muy apreciado por los mineralogistas por los cristales aciculares y por el tono azul claro que toma al momento de estar con luz ultravioleta (Moore, 2003).



*Foto 5.4.2.2. Foto 5.5.9.2. Hidrocincita con hemimorfita en una matriz de goethita con luz ultravioleta "Colección Victoria-Morales", Ciudad de México, 2023.*

### 5.5.10 Smithsonita $ZnCO_3$



Foto 5.5.10.1. Smithsonita en matriz de limonita de los niveles superiores.

La smithsonita es un mineral abundante en la parte superior del yacimiento donde se encuentran los óxidos.

En el estudio de (Hoffman, 1968) hace mención a tres etapas de cristalización: (1) como una sustitución parcial de las calizas recristalizadas, donde el mineral tiene un color grisáceo pálido, (2) la smithsonita tiene un color gris a blanco con un hábito botroidal en una matriz de goethita que se asocia hemimorfita, (3) cristales de un azul claro con un hábito prismático también en una matriz de goethita.

La muestra obtenida en campo en el nivel 2 correspondería a la segunda etapa de mineralización de este carbonato según (Hoffman, 1968); tiene un color gris con un hábito botroidal en una matriz de goethita – limonita.

Se realizó un DRX para la muestra JM- (el subcapítulo 4.2 “Difracción de rayos X”) a la muestra para corroborar que el mineral descrito en muestra de mano estuviera correcto.

## 5.6 Sulfatos, Vanadatos y Molibdatos.

### 5.6.1 Barita $\text{BaSO}_4$



*Foto 5.6.1.1. Barita de color dorado (5721)  
"Colección geográfica", exhibida en Museo de  
Geología, Ciudad de México, 2023.*

La barita es un mineral común en la zona de sulfuros, sin embargo, se pueden encontrar algunos especímenes en la parte oxidada.

Se presenta en forma de roseta y se puede encontrar en colores traslucidos, anaranjados y dorados, este último es el máspreciado por los coleccionistas (Moore, 2003).

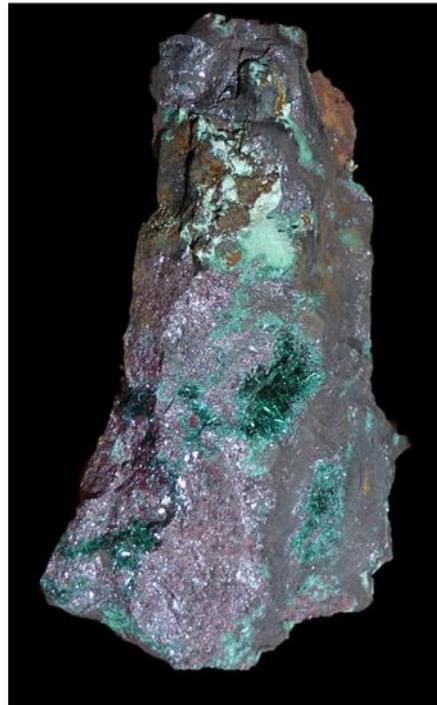
(Panczner, 1987) en (Moore, 2003) identificó que la coloración dependerá de los minerales asociados, es decir, las coloraciones más tráslucidas se encuentran con auricalcita, plattnerita, murdoquita calcita, fluorita e hidrocincita; el color dorado con mimetita y wulfenita

### 5.6.2 Brochantita $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$

La brochantita se encuentra principalmente en la zona superior oxidada asociada a malaquita, cerusita, goethita (Hoffman, 1968) y en ocasiones con cuprita.

La chimenea San Juan es de donde provienen los mejores especímenes con un color verde brillante con un hábito acicular de hasta 1.5 cm de largo (Moore, 2003).

*Foto 5.6.2.1. Mindat. (sf). Brochantita con malaquita en cuprita de La Ojuela, Mapimí, Dgo. [Foto]. Recuperado de <https://www.mindat.org/photo-1134939.html>*



### 5.6.3 Vanadinita $Pb_5(VO_4)_3Cl$

La vanadinita es un mineral tipo mexicano de Zimapán, Hidalgo, descubierto por Andrés Manuel del Río. Se encuentra asociado a wulfenita, calcita y goethita (Panczner, 1987) en (Moore, 2003). Tiene un color amarillo pálido con forma prismática.

La vanadinita es un vanadato extremadamente difícil de conseguir, se puede encontrar donde es prácticamente inexistente el As, según (Hoffman, 1968) la veracidad que existan los muchos ejemplares que están en venta es difícil de corroborar.



Foto 5.5.6.3. Mindat. (sf). Vanadinita en matriz de goethita de La Ojuela, Mapimí, Durango. "Colección William B. Sanborn, ED. D. "[Foto]. Recuperado de <https://www.mindat.org/photo-494246.html>

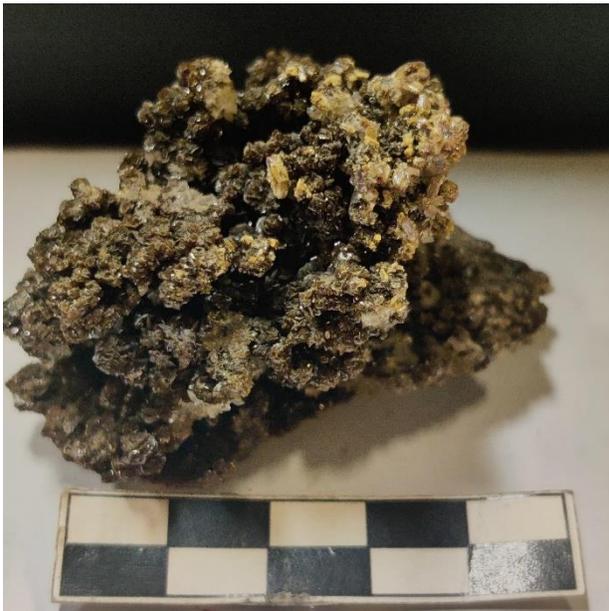


Foto 5.6.4. Cristales de descloizita de color negro con cristales blancos de vanadinita "Colección Victoria-Morales", Ciudad de México, 2023.

### 5.6.4 Descloizita $Pb_5(VO_4)(OH)$

La descloizita se encuentra en el primer nivel de La Ojuela (Moore, 2003), que corresponde a la zona de oxidación.

Está asociado a barita, fluorita, plattnerita, rosasita, wulfenita, rosasita, murdoquita y auricalcita (Hoffman, 1968).

Tiene un color negro pardusco con un lustre graso, con un hábito prismático tabular. Es el mineral con V más común, sin embargo, no es tan fácil de encontrar en la mina (Hoffman, 1968).

### 5.6.5 Wulfenita $Pb(MoO_4)$



*Foto 5.5.10.1. Cristales aciculares aislados de wulfenita en matriz de limonita-goethita.*

La wulfenita es un mineral ampliamente distribuido en la zona de oxidación (Hoffman, 1968).

La muestra obtenida en campo corresponde al nivel cuatro, se encontró en la zona entre la transición de la zona oxidada y sulfurada.

La wulfenita tiene un color amarillo ocre, con cristales euhedrales aciculares de hasta 5 mm, en una matriz de limonita.

En la muestra de mano recolectada en campo solo se observó limonita y goethita, (Hoffman, 1968) asocia la wulfenita con duftita, mimetita, calcita, adamita y plattnerita.

Se tienen diferentes colores de wulfenita desde el amarillo ocre, anaranjado rojizo, pardo y negro (Moore, 2003), ha sido motivo de estudio; (Johnson, 1962) en (Moore, 2003) propone que la coloración amarilla está asociada a calcita, mimetita y plattnerita, mientras que el color rojizo es producto de inclusiones de litargirio (Panczner, 1987) en (Moore, 2003).

Los mejores especímenes se encontraron en la Campana entre el nivel 5 y 7, con cristales de tamaño de 2.5 a 4 cm (Moore, 2003).

## 5.7 Fosfatos y Arseniatos.

### 5.7.1 Arsenodescloizita $PbZn(AsO_4)(OH)$



*Foto 5.7.1.1. Arsenodescloizita verde, con cristales de hidrocincita blancos y mimetita amarilla. "Arizona Mineral Museum Collection", Az, USA. Wendell Wilson Recuperado de (Moore, 2003).*

La arsenodescloizita es un arseniato raro de encontrar en La Ojuela, se ubica en los niveles superiores donde los óxidos predominan.

Está asociado a mimetita, goethita e hidrocincita. Fue descubierta en 1982 en Tsumeb, Namibia (Moore, 2003), pero se tiene registro que ejemplares con arsenodescloizita fueron encontrados en la chimenea San Juditas en La Ojuela.

Tiene un hábito botroidal con lustre adamantino y un color verde limón oscuro.

### 5.7.2 Conicalcita $CaCu(AsO_4)(OH)$

La conicalcita es un arseniato fácil de encontrar en las zonas oxidadas del yacimiento de La Ojuela (Hoffman, 1968).

La conicalcita tiene un color verde olivo, con un hábito cristalino que cubre toda la matriz de goethita con óxidos de manganeso, aunque también se puede encontrar en forma botroidal; los cristales no son mayores a 1 mm. Se asocia a goethita, calcita, malaquita y mimetita (Hoffman, 1968).



*Foto 5.7.2.1. Conicalcita verde en matriz de limonita (0438) "Colección geográfica", exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.*

Los mejores ejemplares encontrados fueron en el nivel 2 en el manto *San Carlos* en la zona llamada “manganeso” por el alto contenido de este elemento, fueron explotados en la década de 1970 con el nombre de bartita (un nombre en desuso de lo que se creía la relación entre conicalcita con austinita) (Moore, 2003)



Foto 5.5.2.2. Conicalcita (verde limón) con malaquita en matriz de goethita con óxidos de manganeso “Colección privada”.

### 5.7.3 Austinita $\text{CaZn}(\text{AsO}_4)(\text{OH})$



Foto 5.7.3.1. Austinita verde pálido en matriz de limonita-goethita (3278) “Colección geográfica”, exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.

La austinita es un mineral producto del enriquecimiento supergénico en la zona de oxidación y al igual que la conicalcita se encuentra en el manto *San Carlos* s (Moore, 2003), también se puede encontrar en *América Dos* y *San Juan* (Hoffman, 1968).

El color típico del mineral es un beige pardo claro, sin embargo, hay una variedad de austinita cuprífera donde se torna en un verde pálido.

Se encuentra asociado a óxidos de manganeso, conicalcita, calcita, goethita y limonita.

La muestra de mano consiste en una matriz de limonita-goethita un poco fracturada, donde cristales euhedrales de calcita las están rellenando, mientras la austinita de color verde pálido producto del alto contenido de Cu está rellenando la cavidad de la roca.



La austinita color beige crema con un lustre sedoso tiene un hábito botroidal, se encuentra en una matriz de goethita. Estos especímenes generalmente tienen sobrecrecimientos de calcita incolora (Williams, ca. 1965) en (Moore, 2003).

*Foto 5.7.3.2. Austinita beige en matriz de goethita (1034) "Colección geográfica", exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.*

#### 5.7.4 Lotharmeyerita $\text{CaZn}_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$



La lotharmeyerita es uno de los cinco minerales tipo mexicano de La Ojuela. Es un mineral raro que pertenece al grupo de los arseniatos. Fue descubierto por primera vez en la mina La Ojuela, Mapimí, Durango, México. Se nombra en honor a Lothar Meyer, un famoso mineralogista alemán.

Se presenta en forma de pequeños cristales prismáticos tabulares de color amarillo a verde amarillento. Tiene una estructura cristalina tetragonal.

*Foto 5.7.4.1. Lotharmeyerita con cristales de adamita morada (3976) "Colección geográfica", exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.*

Descrito por primera vez en 1983 por Dunn en un espécimen de adamita morada (manganoadamita) (Moore, 2003). Ha sido

objeto de estudio desde su descubrimiento. En 2002 un grupo de investigadores liderados por Brugger determinaron que el contenido de Mn es mayor al del Zn, por lo que la manera correcta de llamarlo es manganolotharmeyerita) (Moore, 2003).

### 5.7.5 Parasimplesita $\text{Fe}^{2+}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$ - Kottigita $\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

La parasimplesita conforma una serie completa con la kottigita, la cual se encuentra completa en La Ojuela (Moore, 2003), en la que el Fe (parasimplesita) y el Zn (kottigita) son los extremos. Es un mineral muy raro de encontrar (Hoffman, 1968), se encuentra en la zona de oxidación.

La muestra obtenida se encuentra en una matriz de limonita en la que en algunas cavidades se tiene paradamita de color amarillo, la kottigita tiene un lustre sedoso de un color azul a azul oscuro, tienen un hábito acicular radial.

También se le conoce como legrandita azul (Panczner, 1987) en (Moore, 2003), este asociado a calcita, yeso, smithsonita y legrandita. La parasimplesita-kottigita suele ser un indicador que cerca se encuentran especímenes de legrandita (Moore, 2003).

Los mejores especímenes fueron encontrados en la chimenea Paloma Oriente durante los 60s y principios de los 70s, sin embargo, en la actualidad es muy difícil encontrar algún ejemplar y aún más difícil de tan buena calidad (Moore, 2003).



Foto 5.7.5.1. (1) Parasimplesita en una matriz de goeita "Colección privada" (2) Kottigita con cristales de legrandita en matriz de limonita (5008) "Colección geográfica", exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.

### 5.7.6 Escorodita $\text{Fe}^{3+}\text{AsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

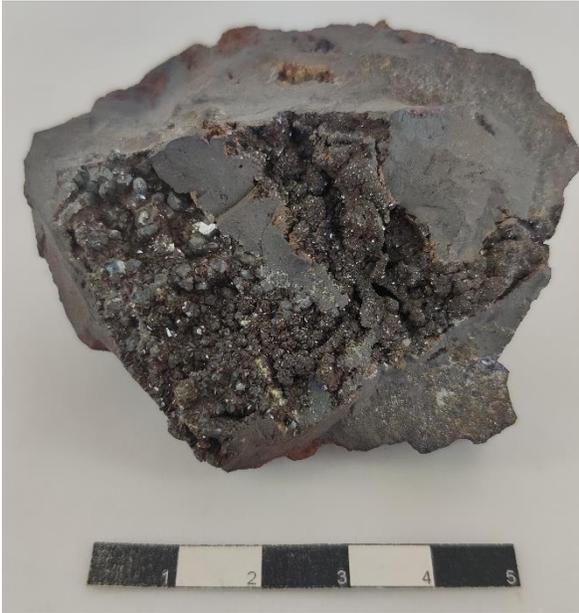


Foto 5.7.6.1. Escorodita en matriz de goethita (3993)  
"Colección geográfica", exhibida en Museo de  
Geología, Ciudad de México, 2023.

Es un arseniato ubicado en la zona de oxidación, donde los mejores cristales se han encontrado en la chimenea de San Judas (Moore, 2003).

La muestra del Museo de Geología se halla en una matriz de limonita goethita, se observan cristales de escorodita azul grisáceo con lustre vítreo con forma de pirámide se encuentra encima de lo que para hacer carminita que tiene forma de roseta.

La escorodita fue encontrada por primera vez en 1927 y está asociada a arseniosiderita, dusertita, carminita y goethita (Moore, 2003).

### 5.7.7 Miguelromeroita $\text{Mn}_5(\text{AsO}_4)_2(\text{HAsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

La miguelromeroita es el último descubrimiento de los cinco minerales tipo de La Ojuela. Es un arseniato raro que fue descubierto en 1981, pero se describió como villyaellenita, sin embargo, fue hasta 2008 descrito por el mineralogista estadounidense Anthony R. Kampf mientras estudiaba muestras de villyaellenita. El nombre es en honor al mineralogista mexicano Miguel Romero que dedicó gran parte de sus investigaciones al distrito minero La Ojuela (Kampf, 2009).

Es un mineral supergénico ubicado en la zona de oxidación. Monoclínico de color rosado pálido, se presenta forma de abanico formado por cristales prismáticos. Se encuentra en las cavidades de goethita a villyaellenita. Aun cuando es un mineral tipo mexicano los mejores especímenes se encuentran en Veta Negra, Chile.



Foto 5.7.7.1. Miguelromeroita en matriz de limonita "Colección privada Domenico Preite" 2010 Matteo Chinellato.

#### 5.7.8 Mimetita $Pb_5(AsO_4)_3Cl$ - Piromorfita $Pb_5(PO_4)_3Cl$

La serie mimetita - piromorfita existe en su totalidad en la zona superior del yacimiento que corresponde a la parte oxidada (Johnson, 1962) en (Moore, 2003).

La piromorfita es de color verde pálido con un lustre adamantino, con un hábito globular donde los cristales están separados unos de otros.; algunos cristales se encuentran dentro de calcita cristalina. Se encuentra en una matriz de limonita

Se encuentra asociado a cerusita, goethita, plumbojarosita, bindeimita, wulfenita y anglesita (Hoffman, 1968).

La mimetita es un mineral ampliamente distribuido en la zona de oxidación, con un color amarillo con lustre adamantino, se presenta en un hábito botroidal. Al contrario que la piromorfita está asociado con muchos minerales como cerusita, wulfenita, arsenodescloizita, hemimorfita, goethita, bindeimita, cerusita, carminita, plumbojarosita y plata (Hoffman, 1968).

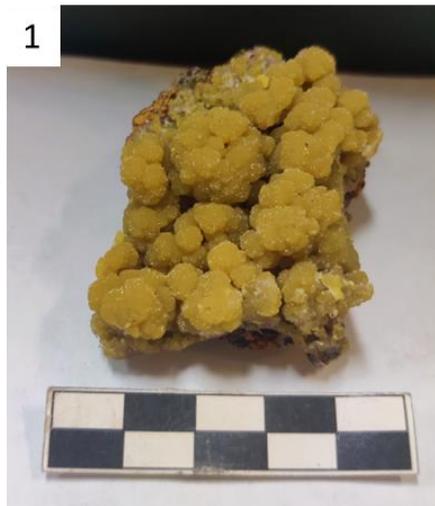


Foto 5.7.7.1. (1) *Mimetita botroidal* en matriz de limonita “Colección Victoria-Morales” (2) *Piromorfita* en matriz de limonita-goethita (74188) “Colección geográfica”, exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.

### 5.7.9 Adamita $Zn_2(AsO_4)(OH)$

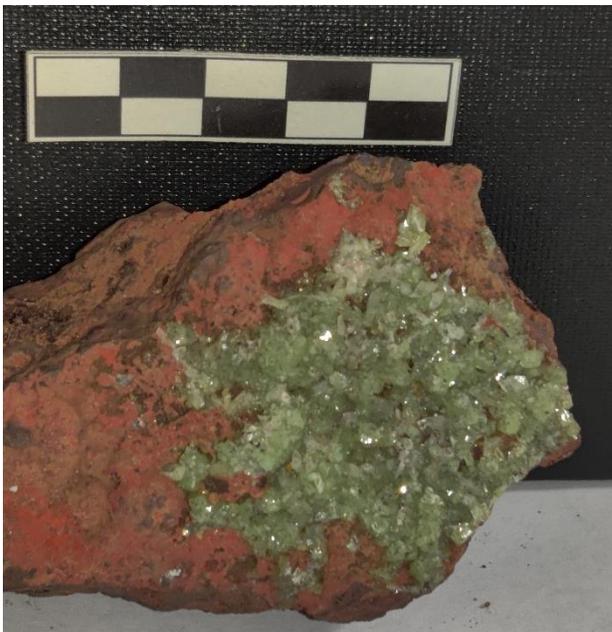


Foto 5.7.8.1. Adamita en matriz de goethita del nivel 3, variedad cuproadamita.

La adamita aun cuando no es un mineral tipo de La Ojuela, es uno de los minerales insignia y por lo cual es famoso el distrito minero. Los mejores especímenes en el mundo salen de La Ojuela, además de ser el mayor productor de adamita en el mundo (Moore, 2003).

Es un mineral secundario que se forma en las zonas de oxidación asociado con: smithsonita, calcita, hemimorfita, legrandita y conicalcita (Hoffman, 1968).

Se presenta en forma prismática en forma de abanicos y en ocasiones en hábito botroidal. La coloración tiende a amarillo cuando está más pura, sin embargo, los cristales más preciados son los morados y blancos que contienen manganeso y cobre respectivamente,

El primer descubrimiento de adamita fue en 1946 por Dan E. Meyers (Moore, 2003). Durante la década de 1960 la adamita era usualmente fácil de encontrar así que el precio era bastante accesible (Moore, 2003), en la década de 1970 la adamita escaseaba, pero fue encontrado otra zona rica en mineral, no obstante, los mineros se dieron cuenta lo difícil que era tener buenos especímenes de adamita por lo cual su precio se incrementó (Moore, 2003).

Los lugares donde han sido encontrados los mejores especímenes son en: la chimenea San Juan Poniente, zona Número 9, área Tesoro 12, y San Judas (nivel 5, 6 y 7) (Moore, 2003).

En el nivel 4 se han hallado los ejemplares con la coloración amarilla mientras que en el nivel 6 en San Judas se ha encontrado la adamita morada y blanca (Moore, 2003).

En ocasiones presenta una fuerte fluorescencia por la presencia de uranio en su estructura cristalina.

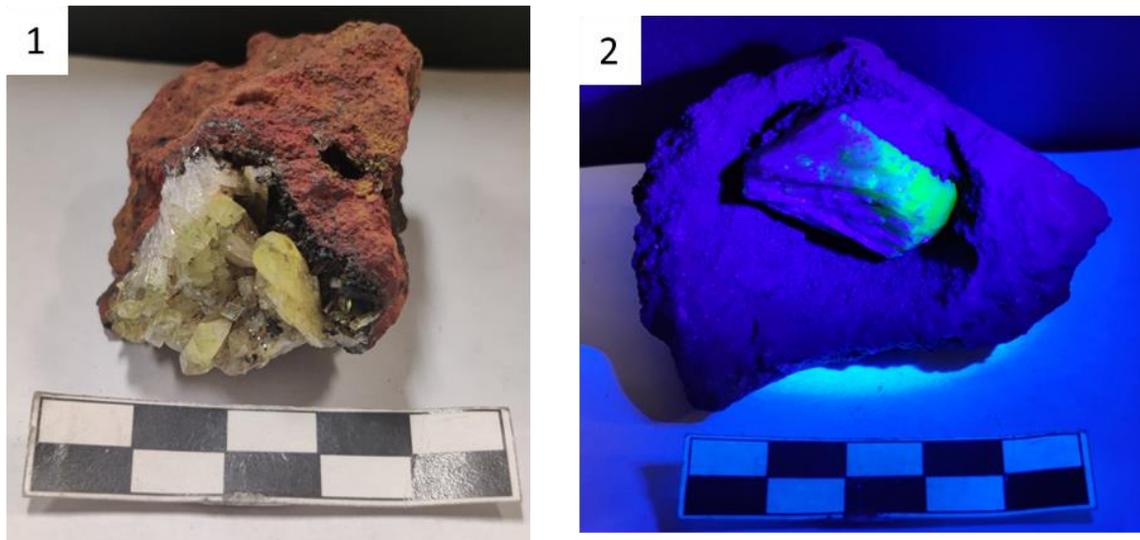


Foto 5.7.8.2. (1) Cristales de adamita de color amarillo en matriz de goethita “Colección Victoria-Morales”  
(2) Adamita con luz ultravioleta, se observa la fluorescencia del mineral “Colección Victoria-Morales”.

### 5.7.10 Paradamita $Zn_2(AsO_4)(OH)$



La paradamita es un dimorfo de la adamita, cristaliza en el sistema triclinico (Moore, 2003). Al igual que la adamita es un mineral ubicado en la zona de oxidación.

De color amarillo con lustre adamantino y hábito globular y aveces en agregados cristalinos. Se encuentra asociado a adamita, mimetita, legrandita, goethita y limonita (Moore, 2003).

Contrario a la basta cantidad de adamita, la paradamita es un mineral extremadamente raro de conseguir (Panczner, 1987) en (Moore, 2003).

Foto 5.7.9.1. Paradamita en matriz de goethita. "Colección Ronald J. Pellar", Recuperado de <https://www.fabreminerals.com/LargePhoto.php?FILE=Paradamite-EH10AA1f.jpg&LANG=ES>

### 5.7.11 Legrandita $Zn_2(AsO_4)(OH) H_2O$



La legrandita es la mineral más famoso en el distrito de La Ojuela y el que la mayoría de los pequeños mineros desean encontrar.

Se halla entre los niveles 3 y 6 que corresponde a la zona de oxidación dónde la variación del nivel estático del agua conforme a las estaciones del año expone algunos cristales de legrandita

Se encuentra en una matriz de limonita de color amarillo brillante con un lustre vítreo

Foto 5.7.10.1. Legrandita en matriz de limonita (4997) "Colección geográfica ", exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.

con un hábito prismático relleno una cavidad, también se puede encontrar en cristales tabulares en forma radial. La muestra contiene kottigita, limonita. En el estudio de (Hoffman, 1968) se asocia a carminita, arsenosiderita, adamita, paradamita, dusertita y escorodita.

En la actualidad la escuela es la única mina que produce legrandita de calidad gema (Moore, 2003). Se han encontrado zonas ricas en legrandita en la chimenea Paloma Oriente y en el manto San Carlos (Moore, 2003).

En 1977 fue encontrado el “Sol Azteca” el mineral más famoso de La Ojuela por Félix Esquivel, una legrandita de 18.7 cm que perteneció al mineralogista mexicano Miguel Romero. Se encuentra valorado en dos millones de dólares.



Foto 5.7.10.2. Sol Azteca en matriz de limonita exhibida en Museo de Beirut, Linado, sf, desconocido.



Foto 5.7.10.3. (1) Cristales de legrandita de color amarillo en matriz de goethita “Colección Victoria-Morales” (2) Legrandita en cavidad de limonita de un largo de 15 cms. “Rice Northwest Museum of Rocks and Minerals collection”, Or, USA. Bob Jones Recuperado de (Moore, 2003).

### 5.7.12 Mapimita $\text{Zn}_2\text{Fe}^{3+}_3(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

La mapimita conforma uno de los cinco minerales tipo de La Ojuela. Es un arseniato extremadamente raro que fue descubierto a principios de los años 70s, sin embargo, fue hasta 1981 cuando lo describió por primera vez el mineralogista Cesbron (Moore, 2003).. El nombre es en honor al municipio de Mapimí.

Es un mineral supergénico ubicado en la zona de oxidación. Monoclínico de color verde a verde azulado y se presenta en las cavidades de goethita asociado a smithsonita, escorodita, ojuelaita y paradamita (Moore, 2003). No ha sido encontrado en ninguna otra localidad del mundo.

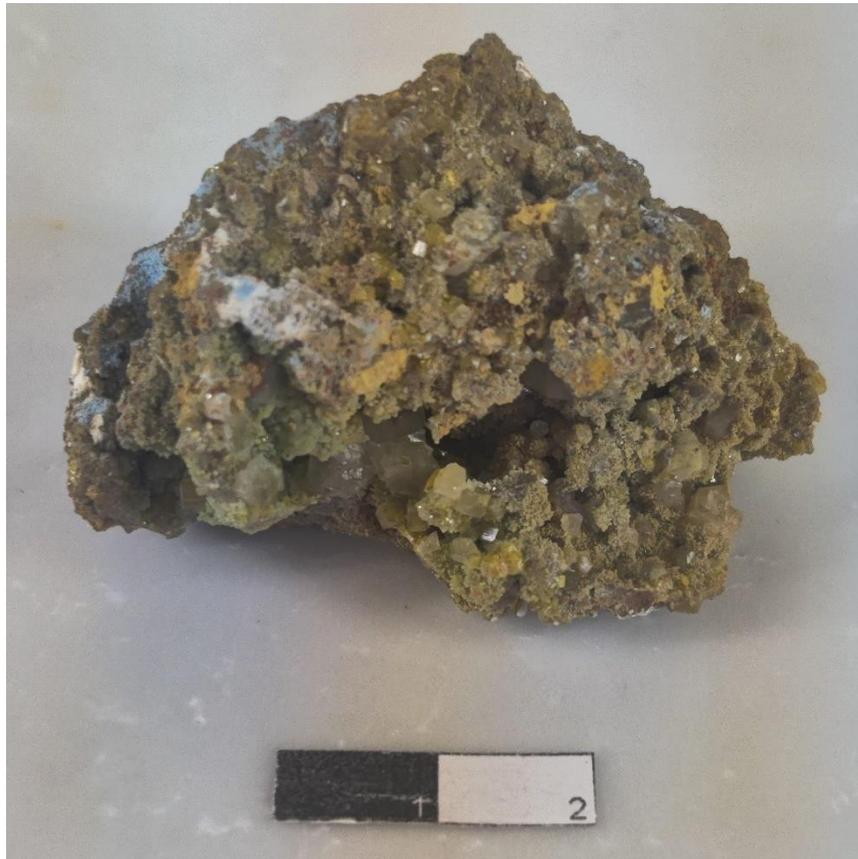


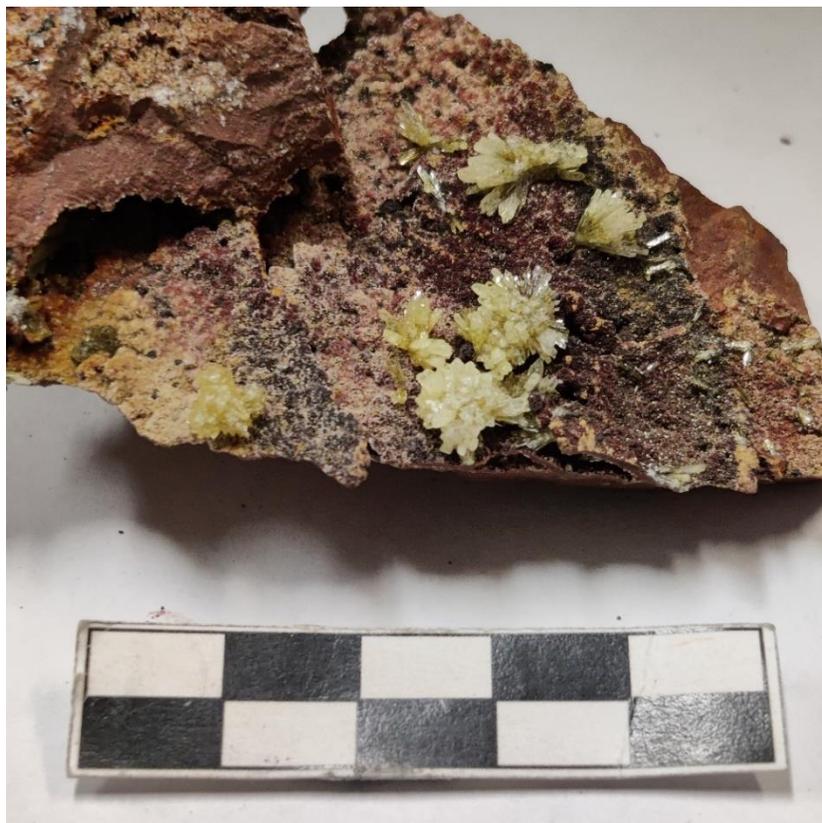
Foto 5.7.11.1. Cristales de mapimita en una matriz de limonita “Colección Victoria-Morales”.

### 5.7.13 Ojuelaita $\text{ZnFe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Es un arseniato muy raro que fue descubierto a principios de los años 70s en Palomas Oriente, no obstante, fue descrito por el mineralogista Cesbron hasta 1981, en la misma muestra donde se encontró también la mapimita (Moore, 2003). Se nombró en honor a la mina del mismo nombre.

Es un mineral monoclinico que se presenta en forma de pequeños cristales aciculares de color amarillo a amarillo pálido. Se forma en la zona de oxidación como un mineral secundario que se encuentra generalmente sobre goethita y asociado a smithsonita, escorodita, mapimita y paradamita (Moore, 2003).

Es un arseniato muy difícil de encontrar, aunque ha sido encontrado en otras localidades en mundo: Tsumeb, Namibia, Pitiquito, Son, México y Sterling Hill mine, Ogdensburg, New Jersey.



*Foto 5.7.12.1. Cristales de ojuelaita en una matriz de goethita "Colección Victoria-Morales".*

## 5.8 Silicatos.

### 5.8.1 Caolinita $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$

La caolinita en Mapimí es producto de la alteración de los intrusivos antes descritos. Generalmente se encuentran formando y/o reemplazando la matriz de estos.

Se observa en las partes donde los intrusivos afloran y está asociado a clorita, calcita, turmalina, malaquita, goethita y óxidos de manganeso.

*Foto 5.8.1.1. Caolinita formando la matriz del intrusivo con turmalina.*



### 5.8.2 Cuarzo $\text{SiO}_2$



*Foto 5.8.2.1. Cuarzo euهدral con galena y esfalerita.*

El yacimiento en general tiene muy poca presencia de cuarzo. En algunas estructuras como fallas y/o fracturas la roca se encuentra silicificada, sin embargo, no se tienen cristales de cuarzo de buena calidad.

Los cristales encontrados de cuarzo son prismas hexagonales bien formados asociado a la zona de sulfuración; la muestra de campo obtenida tiene galena y esfalerita.

No obstante (Hoffman, 1968) encontró pequeñas drusas de cuarzo de tamaño no mayor a 1 cm en la zona oxidada.

### 5.8.3 Hemimorfita $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$

La hemimorfita se encuentra en la zona de oxidación producto del enriquecimiento supergénico, siendo uno de los últimos en cristalizar en la zona (Moore, 2003).

Es un mineral común de encontrar por su cercanía a superficie. Los cristales son de un color traslúcido en ocasiones rosados anaranjados por la presencia de óxidos de hierro.

Al ser un mineral ampliamente distribuido en la zona está asociado a muchos minerales como: fluorita, sauconita, murdoquita, plattnerita calcita, cerusita, hidrocincita, siderita, smithsonita, adamita, wulfenita y arsenosiderita (Hoffman, 1968).



Foto 5.8.3.1. Hemimorfita en matriz de goethita.



Foto 5.7.7.1. (1) Hemimorfita en matriz de goethita "Colección Victoria-Morales" (2) Hemimorfita en matriz de goethita-limonita "Colección Victoria-Morales".

## 6. Fichas minerales representativos de La Ojuela

Para enriquecer la información descrita de los minerales en muestra de mano se agrega una ficha técnica con las características físicas de cada uno. Se eligieron los minerales tipo y más representativos del distrito.

Las características físicas fueron obtenidas del “*Mindat.org*”.

### 6.1 Rosasita $(\text{Cu,Zn})_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$

Sistema monoclinico			
Dureza	4 – 4.2	Celdas	
Color	Azul verdoso	a	12.873
Raya	Azul claro	b	9.354
Lustre	Vítreo	c	3.156
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.95	$\beta$	110.36°
Localidad tipo	Mina Rosas, Sulcis, Cerdeña, Italia.		
Descubrimiento	En 1908 por el italiano Lovisato, fue aceptado hasta 1959.		



Foto 6.1. Rosasita en matriz de limonita (3277) “Colección geográfica” exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.

### 6.2 Auricalcita $(\text{Zn,Cu})_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$

Sistema monoclinico			
Dureza	1 – 2	Celdas	
Color	Azul pálido	a	13.82
Raya	Azul claro	b	6.419
Lustre	Sedoso	c	5.29
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3.96	β	101.04°
Localidad tipo	Mina Loktevskoye, Macizo de Altái, Rusia.		
Descubrimiento	En 1839 por Theodor Bottger, aceptado hasta 1959.		

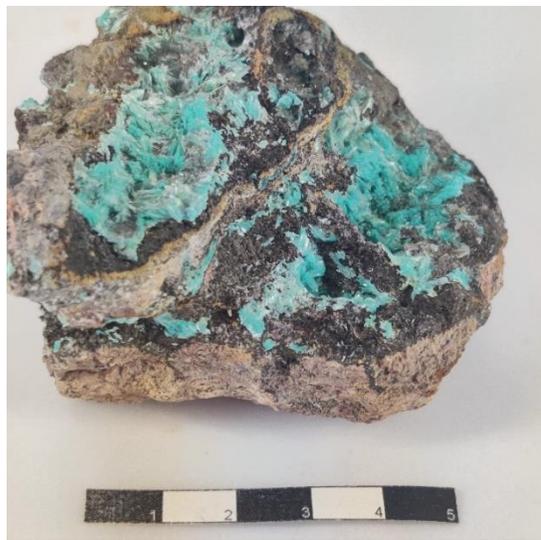


Foto 6.2. Auricalcita (581) “Colección geográfica” exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.

### 6.3 Descloizita $\text{Pb}_5(\text{VO}_4)(\text{OH})$

Sistema ortorrómbico			
Dureza	3 – 3.5	Celdas	
Color	Pardo rojizo, pardo negrusco	a	7.593
Raya	Parda a verde	b	6.057
Lustre	Adamantino	c	9.416
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	6.2	β	-
Localidad tipo	Sierra de Córdoba, Córdoba, Argentina.		
Descubrimiento	En 1854 por August Alexis Damour, aceptado hasta 1959.		



Foto 6.3. Cristales de descloizita “Colección Victoria-Morales”, Ciudad de México, 2023.

### 6.4 Conicalcita $\text{CaCu}(\text{AsO}_4)(\text{OH})$

Sistema ortorrómbico			
Dureza	4.5	Celdas	
Color	Verde oliva	a	7.393
Raya	Verde claro	b	9.22
Lustre	Vítreo, graso	c	5.830
Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	4.33	$\beta$	-
Localidad tipo	Hinojosa del Duque, Córdoba, Andalucía, España.		
Descubrimiento	En 1849 por el alemán August Brithaupt, aceptado hasta 1959.		



Foto 6.4. Conicalcita verde en matriz de limnita (0438) "Colección geográfica", exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.

### 6.5 Austinita $\text{CaZn}(\text{AsO}_4)(\text{OH})$

Sistema ortorrómbico			
Dureza	4 – 4.5	Celdas	
Color	Beige a verde claro	a	7.506
Raya	Blanca	b	9.041
Lustre	Subadamantino	c	5.927
Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	4.13	$\beta$	-
Localidad tipo	Mina Gold Hill, Montes Deep Creek, Utah, Estados Unidos.		
Descubrimiento	En 1935 por el estadounidense Austin F. Rodgers, aceptado hasta 1959.		



Foto 6.5. Austinita verde pálido en matriz de limonita-goethita (1034) "Colección geográfica", exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.

### 6.6 Lotharmeyerita $\text{CaZn}_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Sistema monoclinico			
Dureza	3	Celdas	
Color	Rojizo oscuro, pardo oscuro	a	9.066
Raya	Pardo claro	b	6.276
Lustre	Vítreo	c	7.408
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	4.23	$\beta$	$116.16^\circ$
Localidad tipo	Mina La Ojuela, Mapimí, Durango. México.		
Descubrimiento	En 1983 por Dunn P., aceptado hasta 1985.		



Foto 6.6. Lotharmeyerita con cristales de adamita morada (3976) "Colección geográfica", exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.

### 6.7 Serie de Parasimplesita $\text{Fe}^{2+}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$ - Kottigita $\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

Sistema monoclinico				Sistema monoclinico			
Dureza	2	Celdas		Dureza	2.5 – 3	Celdas	
Color	Verde grisáceo azulado	a	10.352	Color		a	10.24
Raya	Blanca azulada	b	13.60	Raya	Blanca rojiza	b	13.405
Lustre	Sedoso	c	4.80	Lustre	Resinoso	c	4.757
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	3.01	$\beta$	$104.816^\circ$	Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	3.33	$\beta$	$105.21^\circ$
Localidad tipo	Mina Kiura, Ciudad de Saiki, Prefectura de Oita, Japón.			Localidad tipo	Mina Daniel, Neustadtel, Sajonia, Alemania.		
Descubrimiento	En 1954 por el japonés Tei-ichi Ito, aceptado hasta 1959.			Descubrimiento	En 1850 por el alemán O. Kottig, aceptado hasta 1959.		



Foto 6.7. (1) Parasimplesita en una matriz de goeita “Colección privada” (2) Kottigita con cristales de legrandita en matriz de limonita (5008) “Colección geográfica”, exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.

### 6.8 Miguelromeroita $Mn_5(AsO_4)_2(HAsO_4)_2 \cdot 4H_2O$

Sistema monoclinico			
Dureza	4	Celdas	
Color	Rosa pálido	a	18.030
Raya	Rosa claro	b	9.271
Lustre	Vítreo	c	9.776
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3.69	β	96.266°
Localidad tipo	Mina La Ojuela, Mapimí, Durango. México.		
Descubrimiento	En 2008 por el estadounidense Anthony R. Kampf.		



Foto 6.8. Miguelromeroita en matriz de limonita “Colección privada Domenico Preite”2010 Matteo Chinellato.

### 6.9 Adamita $Zn_2(AsO_4)(OH)$

Sistema ortorrómbico			
Dureza	3.5	Celdas	
Color	Amarillo, morado, verde	a	8.304
Raya	Blanca	b	8.524
Lustre	Vítreo	c	6.036
Densidad ( $g/cm^3$ )	4.32 a 4.48	$\beta$	-°
Localidad tipo	Chañarcillo, Atacama, Chile.		
Descubrimiento	En 1866 por el francés Gilbert Josep Adam, aceptado hasta 1959		



Foto 6.9. Adamita en matriz de goethita del nivel 3, variedad cuproadamita.

### 6.10 Paradamita $Zn_2(AsO_4)(OH)$

Sistema triclinico			
Dureza	3.5	Celdas	
Color	Amarillo	a	5.638
Raya	Blanca	b	5.827
Lustre	Vítreo	c	6.692
Densidad ( $g/cm^3$ )	4.55	$\alpha$	103.25°
Localidad tipo	Mina Ojuela, Mapimí, Durango. México.	$\beta$	104.37°
		$\gamma$	87.72°
Descubrimiento	En 1956 por Switzer, aceptado hasta 1959.		



Foto 6.10. Paradamita en matriz de goethita. "Colección Ronald J. Pellar", Recuperado de <https://www.fabreminerals.com/LargePhoto.php?FILE=Paradamite-EH10AA1f.jpg&LANG=ES>

### 6.11 Legrandita $Zn_2(AsO_4)(OH) \cdot H_2O$

Sistema monoclinico			
Dureza	3	Celdas	
Color	Rojizo oscuro, pardo oscuro	a	12.805
Raya	Blanca	b	7.933
Lustre	Vítreo	c	10.215
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3.98 a 4.01	$\beta$	104.23°
Localidad tipo	Mina Flor de Peña, Lampazos de Naranjo, Nuevo León, México.		
Descubrimiento	En 1932 por el belga Louis Legrand, aceptado hasta 1959.		



Foto 6.11. Legrandita en matriz de limonita (4997) "Colección geográfica", exhibida en Museo de Geología, Ciudad de México, 2023.

### 6.12 Mapimita $Zn_2Fe^{3+}_3(AsO_4)_3(OH)_4 \cdot 10H_2O$

Sistema monoclinico			
Dureza	3	Celdas	
Color	Verde pálido	a	11.415
Raya	Blanca	b	11.259
Lustre	Vítreo	c	8.661
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.95	$\beta$	107.74°
Localidad tipo	Mina La Ojuela, Mapimí, Durango. México.		
Descubrimiento	En 1979 por Cesbron y el mexicano Miguel Romero, aceptado hasta 1981.		



Foto 6.12. Cristales de mapimita en una matriz de limonita "Colección Victoria-Morales".

### 6.13 Ojuelaita $\text{ZnFe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Sistema monoclinico			
Dureza	3	Celdas	
Color	Amarillo pálido	a	10.237
Raya	Amarillo claro	b	9.662
Lustre	Vítreo	c	5.562
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	3.39	$\beta$	$94.36^\circ$
Localidad tipo	Mina La Ojuela, Mapimí, Durango. México.		
Descubrimiento	En 1979 por Cesbron y el mexicano Miguel Romero, aceptado hasta 1981.		

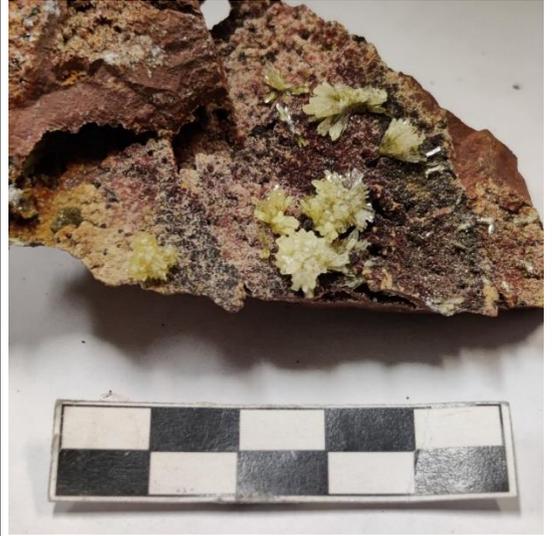


Foto 6.13. Cristales de ojuelaita en una matriz de goethita "Colección Victoria-Morales".

## 7. Conclusiones

La formación de la Sierra Mapimí fue causa de la Orogenia Laramide que consistió en deformar las rocas carbonatadas preexistentes de una manera dúctil por lo que se formaron pliegues que posteriormente originarían el Anticlinal de Mapimí. Los esfuerzos continuaron y se formaron fallas y cabalgaduras, los lugares de debilidad observados fueron los ejes de charnela de los pliegues.

La cercanía con la Sierra Madre Occidental hizo que el área de estudio fuera intrusionada por varios intrusivos siendo el más famoso El Sarnoso, ya que concuerda la edad fechada por (Ma Clark K. et al, 1980) en (García Padilla & Millán Quezada, 2004). La variedad de intrusivos coincide en la poca presencia de  $\text{SiO}_2$ , de ahí se entendería por que se tiene una ausencia de calcosilicatos en el yacimiento. Con relaciones petrográficas y de campo se propone que los pulsos magmáticos fueron cada vez empobreciendo al  $\text{SiO}_2$  libre, siendo el último episodio la sienita de turmalina.

El emplazamiento de los intrusivos, así como los fluidos mineralizantes que los acompañaban se movieron por las zonas de fracturas, fallas y ejes axiales de los pliegues, otro factor que gobernó la geometría de las zonas mineralizadas fue la existencia de un estrato dolomítico de la Fm. Aurora o de lutita calcárea de la Fm. Indidura que concentró el mineral por debajo de este.

Los fluidos hidrotermales tomaron la geometría de las zonas de debilidad generando mantos en donde los estratos dolomíticos y/o de lutitas no permitían el paso, mientras que las chimeneas se formaron en zonas de fallas y/o fracturas en los estratos antes mencionados.

La variedad mineralógica única en el mundo se debe a que existieron las condiciones ideales para la formación y cristalización de las especies minerales fue un intrusivo rico en arsénico emplazadas en rocas carbonatadas con una circulación constante de agua meteórica que

favoreció que cada vez el pH se volviera más ácido, generando una zona de oxidación rica en iones de zinc, plomo y cobre que junto a los óxidos con carbonatos crearon una variedad y cristales únicos.

El origen del arsénico se les atribuye a los minerales de arsenopirita y piritita del intrusivo El Sarnoso, sin embargo, se tiene información que el intrusivo mineralizante fue perforado a una profundidad de 200 m bajo el último nivel de la mina, no se tiene una descripción acertada del intrusivo, por lo cual se propone realizar un estudio más detallado del origen del arsénico en Mapimí.

Otra gran incógnita es saber el verdadero tamaño del yacimiento, ya que siguiendo el esquema de (Sillitoe, 2010) el reemplazamiento de carbonatos forma una parte distal de un skarn que a su vez se encuentra asociado a un pórfido. Se tiene nota que el yacimiento ha sido barrenado con miles de metros, por lo que una nueva interpretación y/o una nueva exploración servirá para tener una mejor idea del tonelaje real que pueda existir en el distrito, tomando en comparación que existe otro yacimiento de características similares prácticamente a menos de 30 km en la Sierra de Bermejillo explotando a gran escala como lo es La Platosa.

Se propone también crear un mapa bien definido de todas las obras mineras existentes que se tengan acceso, ya que la mayoría se encuentran inundadas. Que servirá tanto para la empresa que actualmente explota el yacimiento de una manera a pequeña escala y a los risqueros a optimizar el movimiento dentro de mina.

La gran variedad de arseniatos en Mapimí es única en el mundo, el potencial que tiene para seguir siendo una fuente de descubrimiento de nuevas especies minerales es alta por la gran cantidad de las obras mineras sin cartografiar y otras al estar inundadas. Ha maravillado a los extranjeros tanto que son los que más han investigado la diversidad mineralógica de la mina, por lo que se invita a las diferentes instituciones de México a enriquecer la información existente en la zona.

El distrito minero de La Ojuela es una fuente de turismo para los coleccionistas de minerales muy importante para el poblado de Mapimí, por lo que se propone que se apoyé a la divulgación de los minerales en diferentes medios para atraer todo tipo de turistas, ya que los minerales siempre ha sido una pieza de admiración, curiosidad y belleza para el ser humano.

Todas las investigaciones se han centrado considerablemente en la mineralogía, sin embargo, aún quedan muchas dudas sobre la génesis del yacimiento, la fuente y/ origen de la mineralización y el arsénico; asimismo hay nulos estudios geoquímicos en la zona.

## 8. Bibliografía

- Basáñez L, M. A., & Amezcua, N. (2004). *Formación: Aurora*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Basáñez L, M. A., Amezcua, N., & Díaz Salgado, C. (2006). *Formación: Indidura*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Burrows, R. H. (1910). Geology of Northern México. VII, págs. 85-103. Geological Society of America Bulletin.
- Cantú Chapa, A. (1999). Confrontation of stratigraphic methods to define the Jurassic-Cretaceous. En C. Bartolini, J. L. Wilson, & T. F. Lawton, *Mesozoic sedimentary and tectonic history of North-Central Mexico: Boulder*, (págs. 93-103). Geological Society of America Special Paper 340,.
- Castillejo Carreón, J. C. (2017). *Caracterización del yacimiento de hierro Sol y Luna, Distrito Concepción del Oro, Zacatecas*. Monterrey, Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Castro Moreno, F. R. (1982). *Estudio tectónico de una porción del mar mexicano (Región de Nazas-San Pedro del Gallo, Durango)*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Comisión Federal de Electricidad. (2016). *Descripción de las alteraciones hidrotermales*. Ciudad de México: Comisión Federal de Electricidad.
- Cruz Pérez, R., Torreblanca astro, T., Payán Bañales, E., & De Santiago Céspedes, J. (2000). *Informe final de la carta geológico-minera Torreón, clave G13-9, escala 1:250,000*. México: Consejo de Recursos Minerales.
- Díaz Salgado, C. (2005). *Formación: La Casita*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Díaz Salgado, C. (2006). *Formación: Ahuichila*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Díaz Salgado, C., Amezcua, N., & Sánchez, M. (2006). *Formación: Caracol*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Eguiluz de Antuñano, S., & Campa Uranga, M. F. (1982). Problemas tectónicos del sector San Pedro del Gallo, en los estados de Chihuahua y Durango. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, XXXIV(2), 5-42.
- Espinoza, A. (2020). *Apuntes de yacimientos magmáticos-hidrotermales para el curso de Metalogenia de la Facultad de Ingeniería*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- García Padilla, J. L., & Millán Quezada, L. (2004). *Texto explicativo de la carta Mapimí, clave G13-D14, escala 1:50,000 estado de Durango*. Secretaría de Economía, Consejo de Recursos Minerales. Durango: Gerencia de Geología, Subgerencia Regional Durango.
- Goldhammer, R., & Johnson, C. (2001). Middle Jurassic-Upper Cretaceous paleogeographic evolution and sequence - stratigraphy framework of the northwest Gulf of Mexico rim. (C. Bartolini, R. Buffler, & A. Cantú-Chapa, Edits.) *The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems. American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 75, 45-81.
- Hoffman, V. J. (1968). *The mineralogy of Mapimí mining district, Durango, Mexico*. Tucson, Arizona, U.S: University of Arizona.
- Humphrey, W. E., & Díaz, T. (2003). *Jurassic and Lower Cretaceous Stratigraphic and Tectonics of Northeast of Mexico*. Bureau of Economic Geology.
- Imlay, R. W. (1936). Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico. Part IV Geology of the Western part of the Sierra de Parras. 47(7), págs. 1091-1152. Geological Society of America Bulletin.
- Imlay, R. W. (1937). Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, Mexico. 48(5), págs.

- 587-630. Bulletin of Geological Society of America.
- Imlay, R. W. (1938). Studies of the Mexican Geosyncline. *49*, págs. 1651-1694. Geological Society of America Bulletin.
- Infazón, M. L. (1986). Estudio petrogenético de las rocas ígneas en las formaciones Huizachal y Nazas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, XLVII(2), 1-42.
- Kampf, A. (2009). Miguelromeroite, the Mn analogue of sainfeldite, and redefinition of villyaellenite as an ordered intermediate in the sainfeldite-miguelromeroite series. *American Mineralogist*, 94, 1535-1540.
- Kelly, W. (1981). Gossan. En Springer, *Mineralogía. Enciclopedia de Ciencias de la Tierra*. Boston, MA. Obtenido de [https://doi.org/10.007/0-387-30720-6\\_55](https://doi.org/10.007/0-387-30720-6_55)
- Labarthe Hernández, G., Tristán González, M., & Aranda Gómez, J. (1982). *Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí*. San Luis Potosí, México: de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- López Doncel, R. (2005). *Formación: La Peña*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- López Palomino, I. (2013). *Formación: Zuloaga*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- López Palomino, I. (2015). *Formación: La Gloria*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- López, V. P. (2009). *Turismo y patrimonio minero en el municipio de Mapimí, Durango*. Universidad Autónoma de México.
- MacLeroy, D. F., Franquesa, F., & Romero, S. (1977). Genesis de las Chimeneas y Mantos del Distrito Plumbo-Argentífero de Ojuela, Mapimi, Dgo. *Memoria técnica XII* (págs. 403-437). San Luis Potosí, México: A.I.M.M.G.M.
- Martínez Bravo, R., & López Palomino, I. (2010). *Formación: Cuesta del Cura*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Megaw, P., Ruiz, J., & Titley, S. R. (1988). High-Temperature, Carbonate-Hosted Pb-Zn-Ag Massive Sulphide Deposits of Mexico: An Overview. *Economic Geology*, LXXXIII, 1856-1885.
- Monier Castillo, A. (2012). *Formación: Taraises*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Monier Castillo, A. (2013). *Formación: Lutita Parras*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Monier, A., & López Palomino, I. (2011). *Formación: Cupido*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Moore, T. P. (2003). The Ojuela Mine Mapimí, Durango, Mexico. (P. K. Megaw, Ed.) *Mineralogical Record*, 34(5), 5-87.
- Pantoja-Alor, J., & Rincon Orta, C. (1967). *Edad de Thes Rocas Intrusivas en la Parte Centro-Septentrional de México*. Ciudad de México: UNAM Instituto de Geología.
- PEMEX. (1988). *Estratigrafía de la República Mexicana: Mesozoico*. Petróleos Mexicanos, Subdirección de producción primaria, Coordinación ejecutiva de exploración. México D.F.: Petróleos Mexicanos.
- Pérez Rul, A. M. (1967). *Resumen de la Geología de la Hoja Viesca 13R(5) escala 1:100 000*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Plumlee, G. S., Montour, M., Taylor, C. D., Wallace, A. R., & Klein, D. P. (1996). Polymetallic vein and replacement deposits (Models 19a and 22c; Morris, 1986; Cox, 1986). En E. A. du Bray (Ed.), *Preliminary Compilation of Descriptive Geoenvironmental Mineral Deposit Models* (págs. 121-129). U.S Geological Survey.
- Raisz, E. (1964). *Landform of Mexico (mapa en escala 1:3 000 000)*. Cambridge: Mass.
- Robb, L. (2005). *Introduction to ore-forming processes*. Oxford: Blackwell.
- Rogers, C. L., De Cserna, Z., Van Vloten, R., Tavera Amezcua, E., & Ojeda, R. J. (1961). *Reconocimiento geológico y depósitos de fosfatos del norte de Zacatecas y áreas adyacentes en Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí*. Boletín del Consejo de Recursos Naturales no

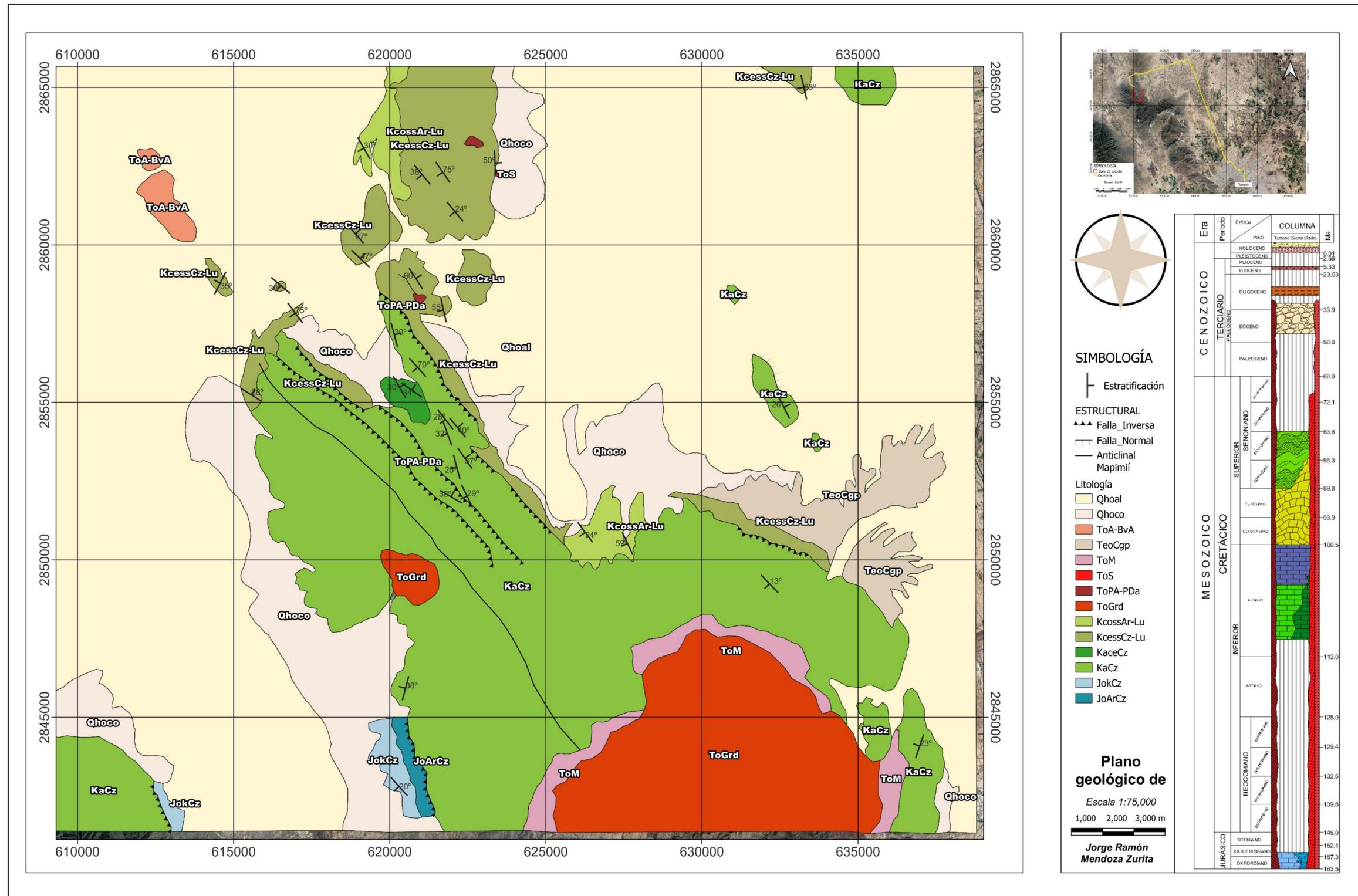
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Renovables.

- Santiago Carrasco, B., Martínez Ramos, C. J., Sánchez Bermeo, G., Chiapa García, R., & Palacios García, R. (2000). *Informe final de la Carta Geológico-Minera Monterrey G14-7 escala 1:250,000, Estados de Coahuila, Nuevo León y Zacatecas*. Pchuca, Hidalgo: Consejo de Recursos Minerales.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Panorama Minero del estado de Durango*. Secretaría de Economía. Durango: Servicio Geológico Mexicano.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry Copper Systems. *Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology, CV*, 3-41.
- SRK Consulting (Canada) Inc. (2018). *Technical Report for the Platosa Silver-Lead-Zinc Mine, Mexico*. Toronto: SRK Consulting (Canada) Inc.
- Universidad Juárez del Estado de Durango. (2016). Revista de Historia de la Universidad Juárez del Estado de Durango. En M. Vallebuena, & C. Carrillo Valdez, *El señor de Mapimí y los despoblamientos del septentrión neovizcaíno, siglos XVII Y XVIII* (Vol. 8, págs. 98-110). Durango, Durango, México: Universidad Juárez del Estado de Durango.

9. Anexo

**Plano 1.** Se muestra el plano generado en la visita de campo con la geología local y los datos estructurales obtenidos.



Mapa 9.1. Mapa geológico estructural de la zona de estudio, 2023.