



**fcfm**

**Geología**

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

Otoño 2021

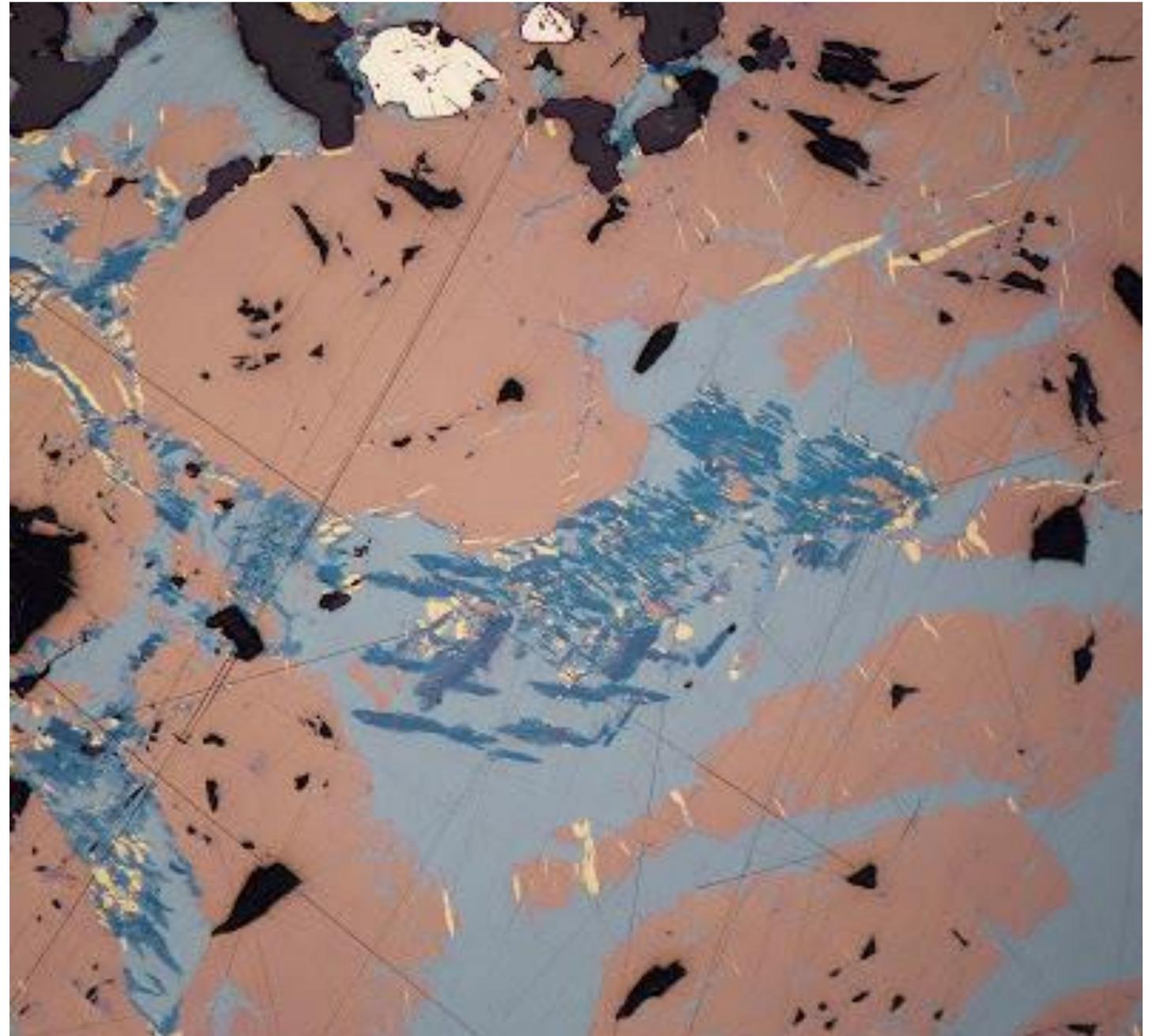
# Metalogénesis: Minerales Opacos

## Sulfuros de Cu

Cuerpo Docente:

Rodrigo Espinoza Reyes

José Moreno Toledo



# Minerales Opacos

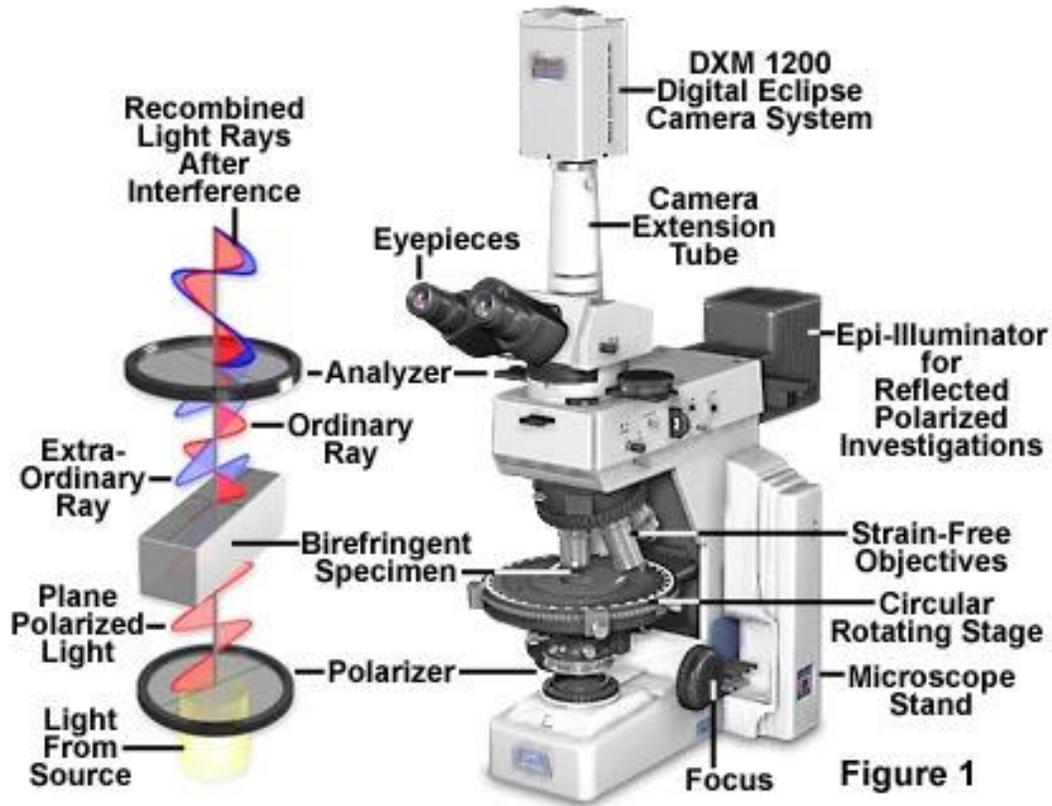
Minerales Opacos → Distintas propiedades que minerales translúcidos (transparentes):

Minerales Transparentes  
↓  
No Metálicos  
↓  
Microscopio de Polarización  
de LUZ TRANSMITIDA

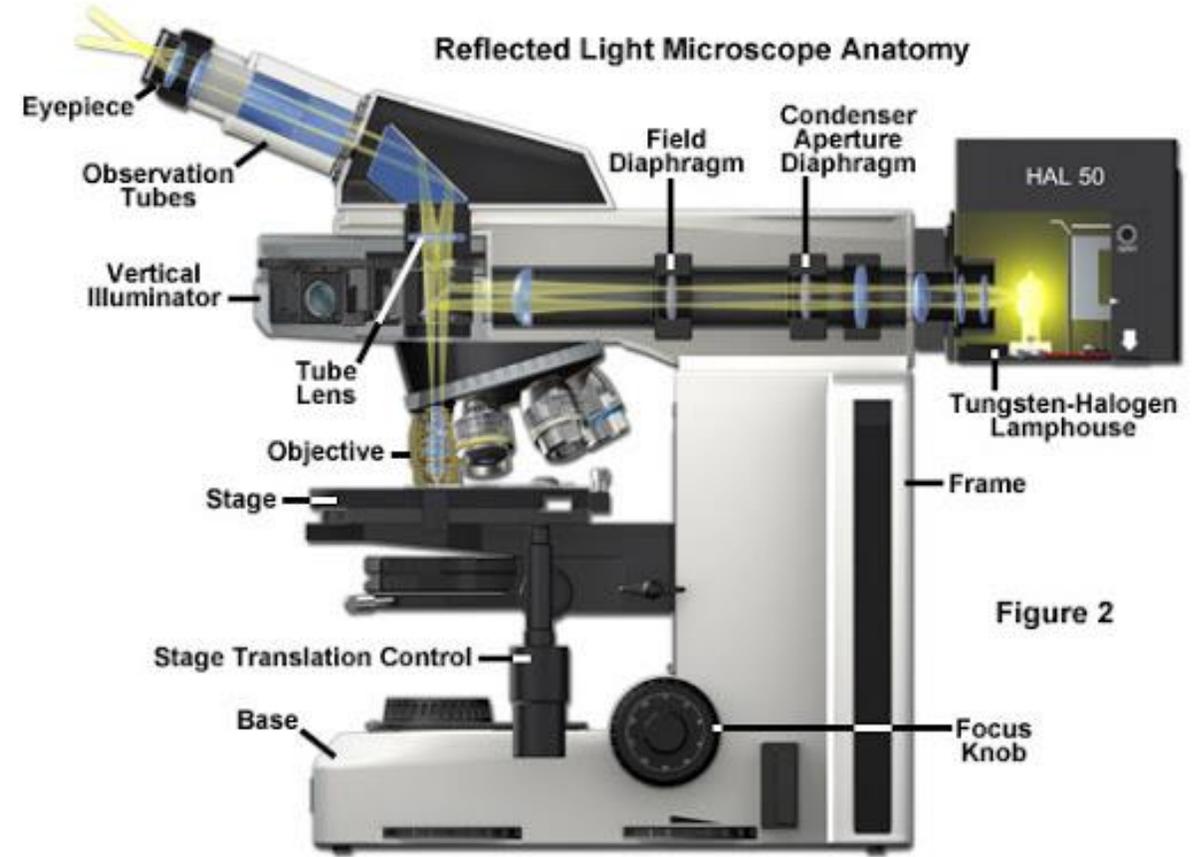
**Minerales Opacos**  
↓  
**Metálicos**  
↓  
Microscopio de Polarización  
de **LUZ REFLEJADA**

# Minerales Opacos

## Polarized Light Microscope Configuration



## Reflected Light Microscope Anatomy



# Propiedades Ópticas

Minerales Opacos → Luz Reflejada → Propiedades Ópticas **distintas**:

## Nícoles Paralelos:

- Color
- Reflectividad (Poder de reflexión)
- Pleocroísmo
- Birreflectancia
- Dureza
- Hábito y forma

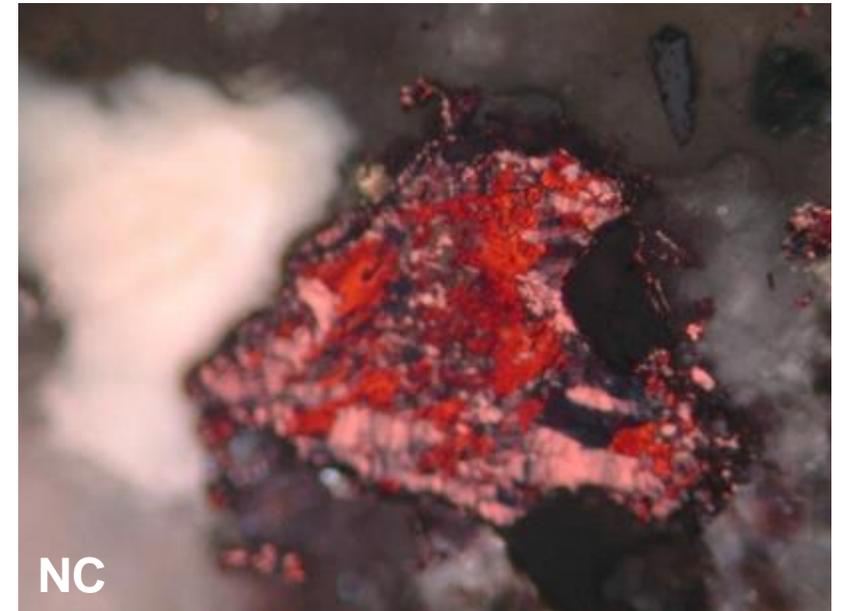
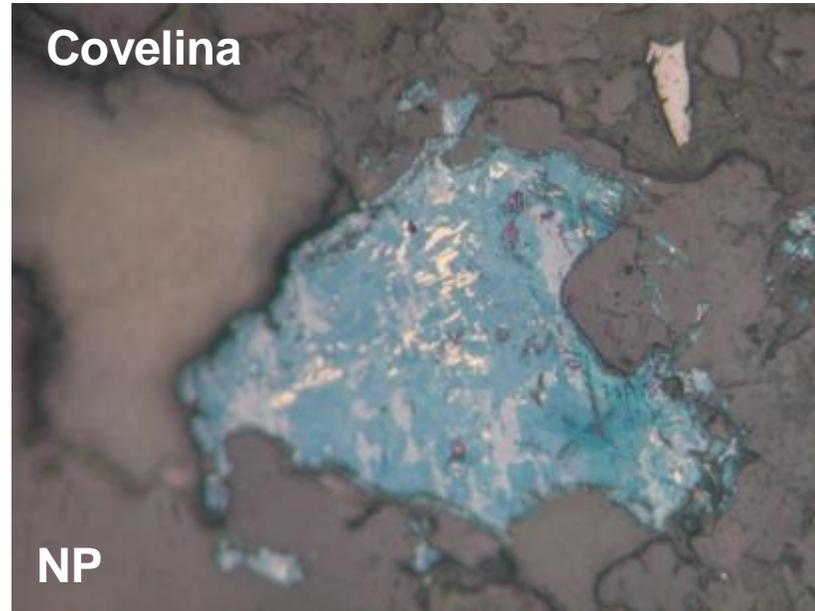


# Propiedades Ópticas

Minerales Opacos → Luz Reflejada → Propiedades Ópticas **distintas**:

## Nícoles Cruzados:

- Anisotropía
- Maclas
- Reflejos internos



# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

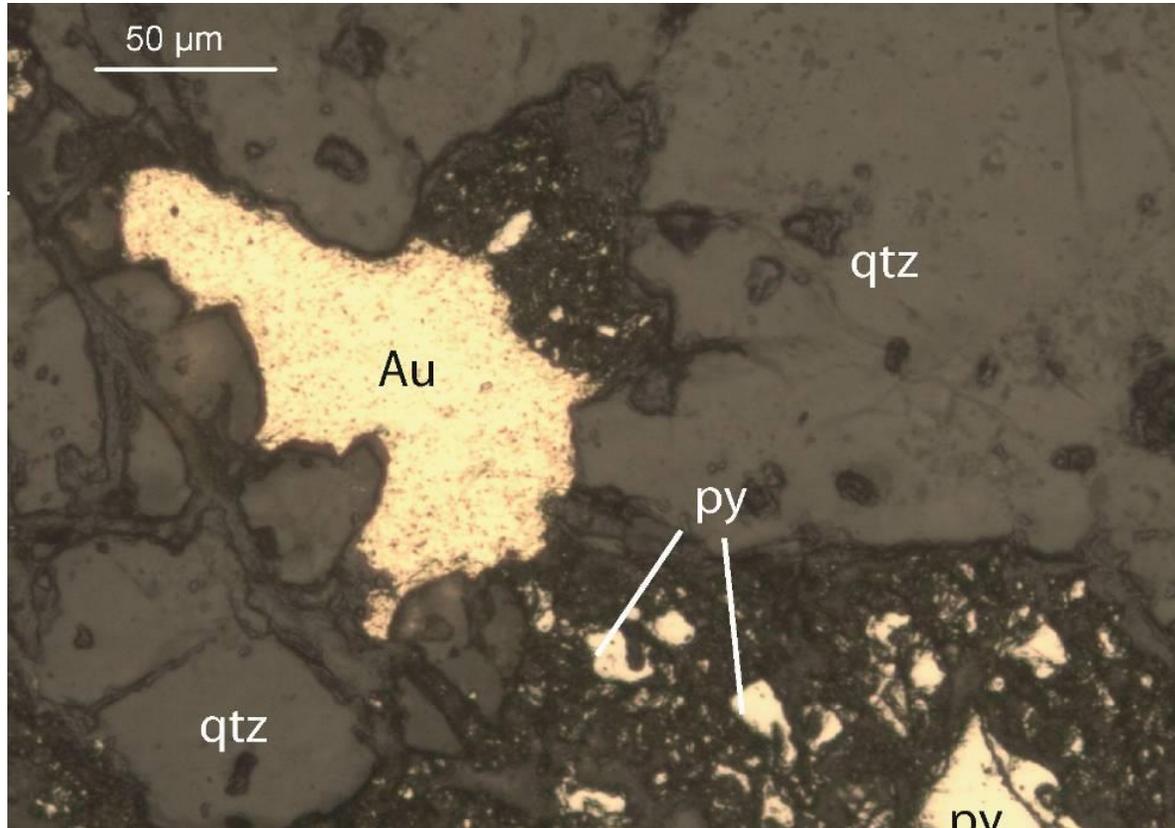
## Color

→ Color del mineral depende de qué longitudes de onda refleja y absorbe (el color corresponde a la radiación del espectro visible reflejada por el mineral).

Color	Minerales
Amarillo	Calcopirita Au nativo
Rosado	Bornita Cu nativo Pirrotina
Verde	Acantita
Azul	Covelina

# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

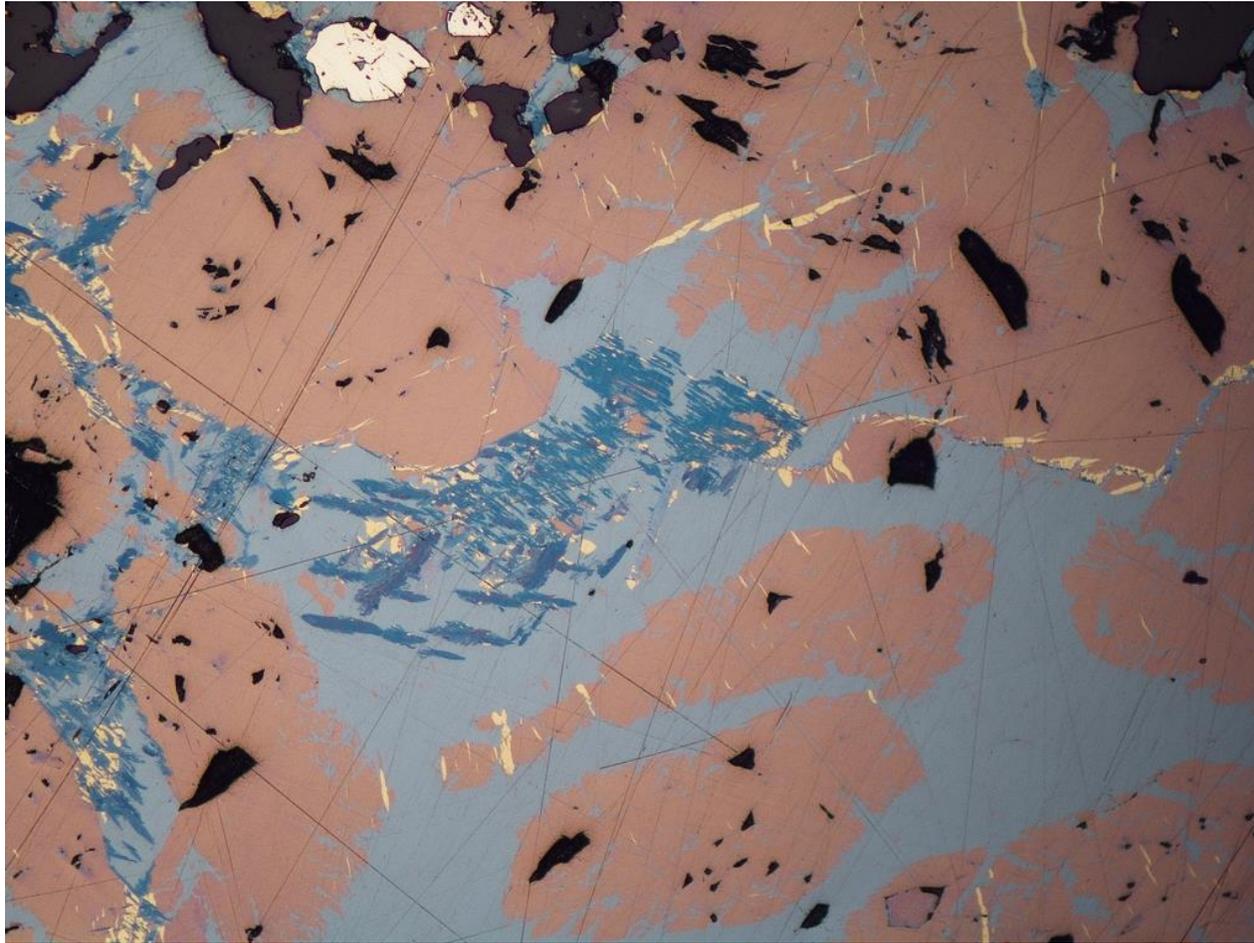
## Color



Color	Minerales
Amarillo	Calcopirita Au nativo
Rosado	Bornita Cu nativo Pirrotina
Verde	Acantita
Azul	Covelina

# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

## Color



Color	Minerales
Amarillo	Calcopirita Au nativo
Rosado	Bornita Cu nativo Pirrotina
Verde	Acantita
Azul	Covelina

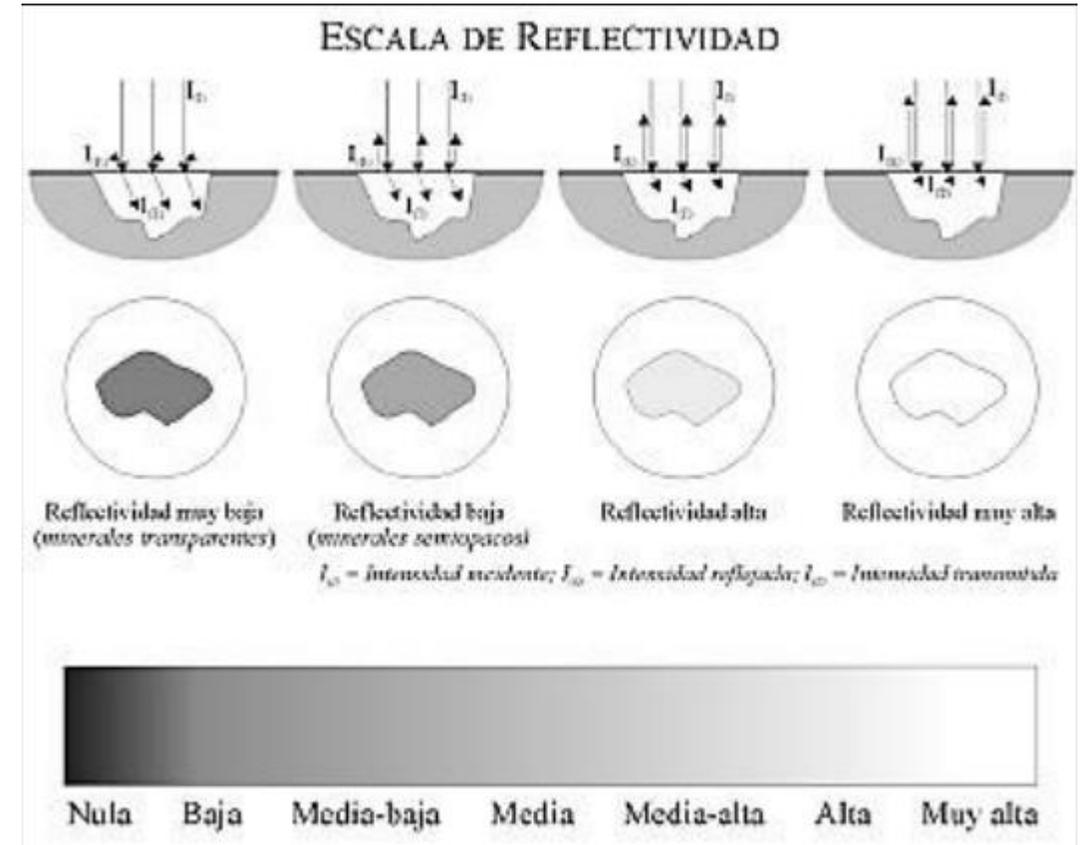
# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

## Reflectividad:

Minerales Opacos → Reflejan la Luz

→cuánta luz reflejen corresponde a reflectividad

- La **Reflectividad** corresponde a la capacidad de un mineral de reflejar la luz que llega a su superficie
- Se expresa como el porcentaje de luz reflejado por el mineral (ante la luz blanca).
- Mediante esta propiedad se clasifica entre minerales transparentes, semitransparentes y opacos.



# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

## Reflectividad

Reflectividad	R	Minerales
Transparentes (Silicatos, carbonatos, etc.)	<10%	Fluorita <b>Cuarzo</b> Barita Carbonatos
Baja	15-20%	<b>Goethita</b> <b>Esfalerita</b> <b>Magnetita</b> Cromita Casiterita
Media-Baja	20-30%	<b>Bornita</b> <b>Hematita</b> <b>Covelina</b> Enargita Tetraedrita

Reflectividad	R	Minerales
Media	30-40%	<b>Calcopirita</b> <b>Pirrotina</b> <b>Calcosina</b> Acantita
Media-Alta	40-50%	<b>Galena</b>
Alta	50-70%	<b>Pirita</b> Arsenopirita Marcasita Niquelina
Muy Alta	>70%	Ag Nativa Au Nativo Cu Nativo

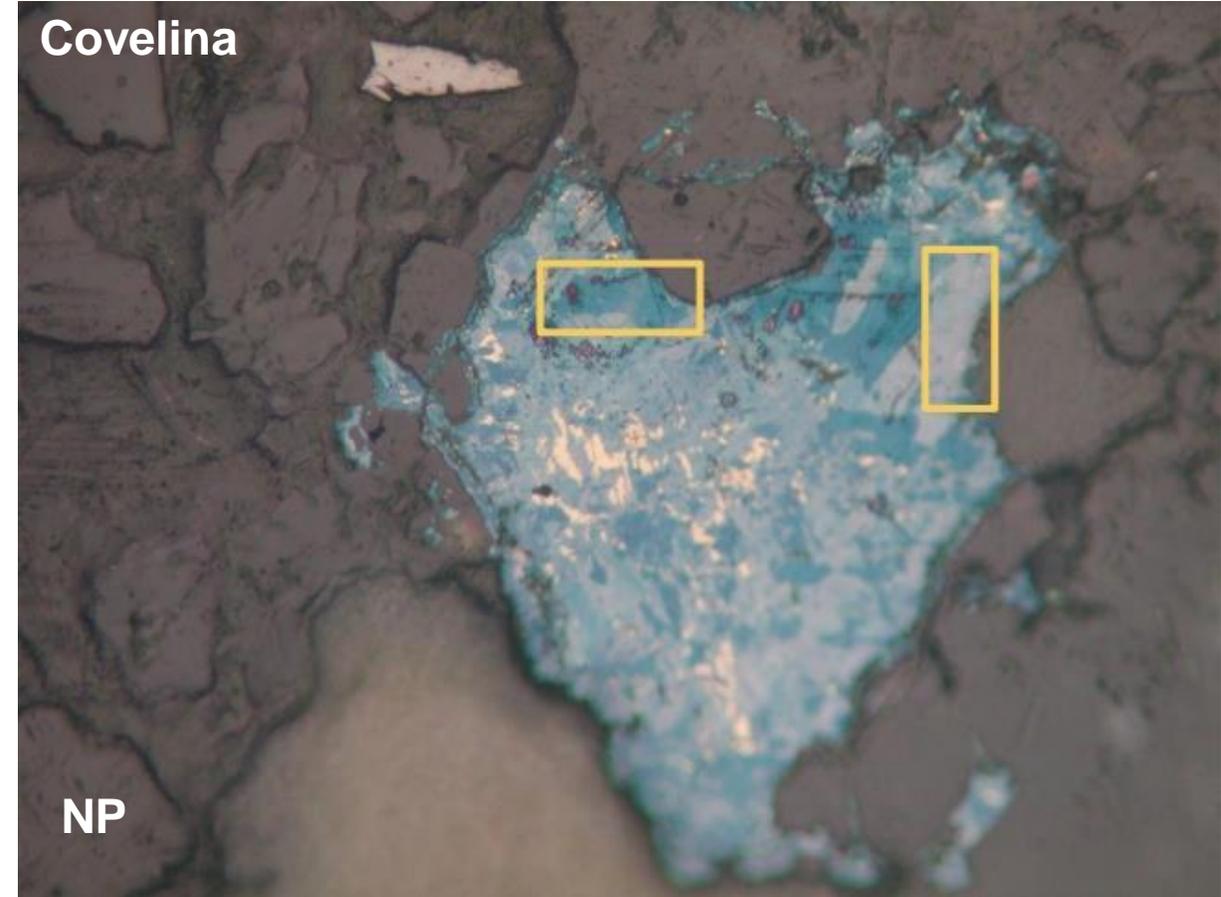
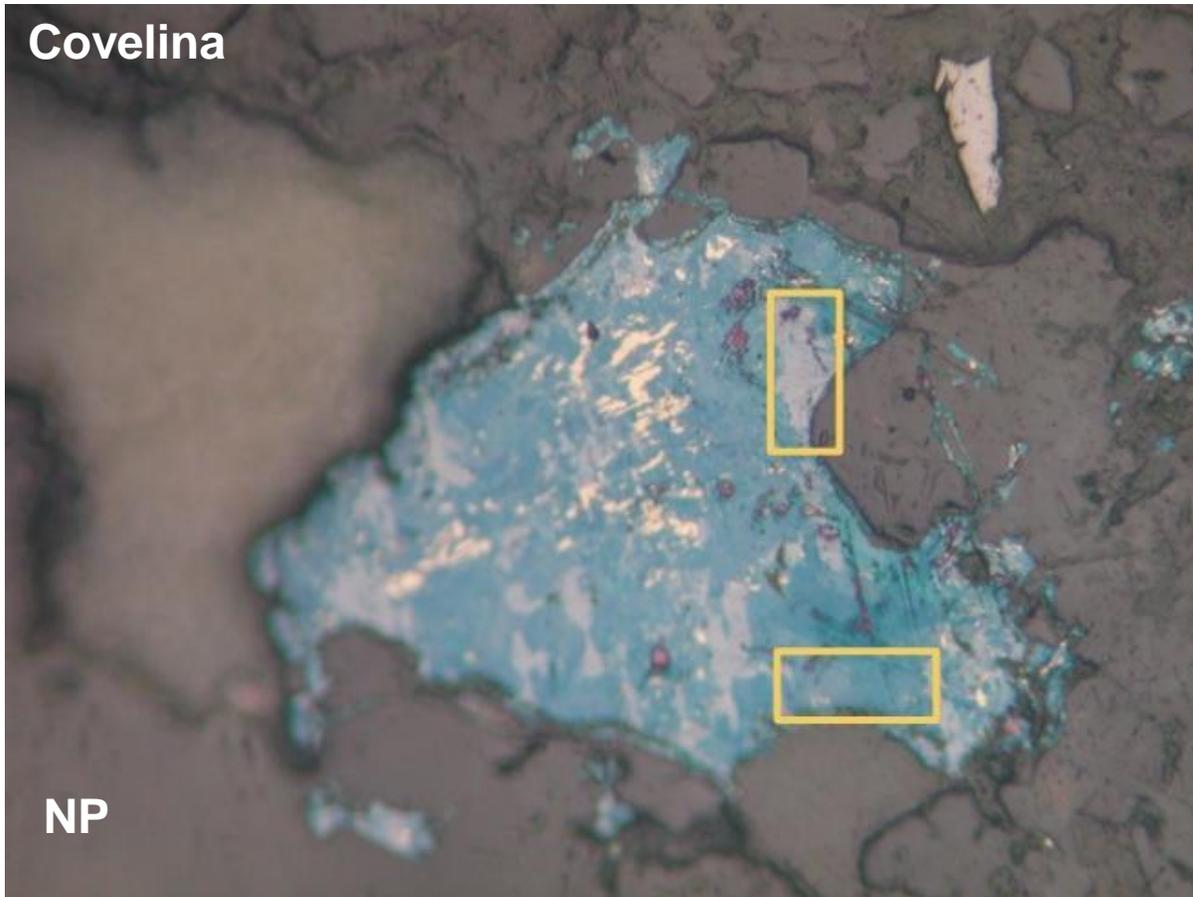
# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

## **Pleocroísmo:**

- Propiedad que tienen algunos minerales no cúbicos de cambiar de color o tonalidad al girar la platina a nícoles paralelos.
- El pleocroismo es el fenómeno análogo a la birreflectancia para el caso de los minerales coloreados → Birreflectancia corresponde a la variación de la reflectividad según la orientación de un cristal.

# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

**Pleocroísmo:**



# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

## Birreflectancia:

- **Variación en la reflectividad** de un mineral **según su orientación**.
- Puede ser observada en un solo grano mineral girando la platina, sin embargo es más **fácil de observar comparando los diferentes granos de un mismo mineral en un agregado policristalino**.

Birreflectancia	Minerales
Fuerte	<b>Molibdenita</b>
Media	Niquelina Marcasita
Débil	<b>Hematita</b> <b>Pirrotina</b> Arsenopirita

# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

## Dureza:

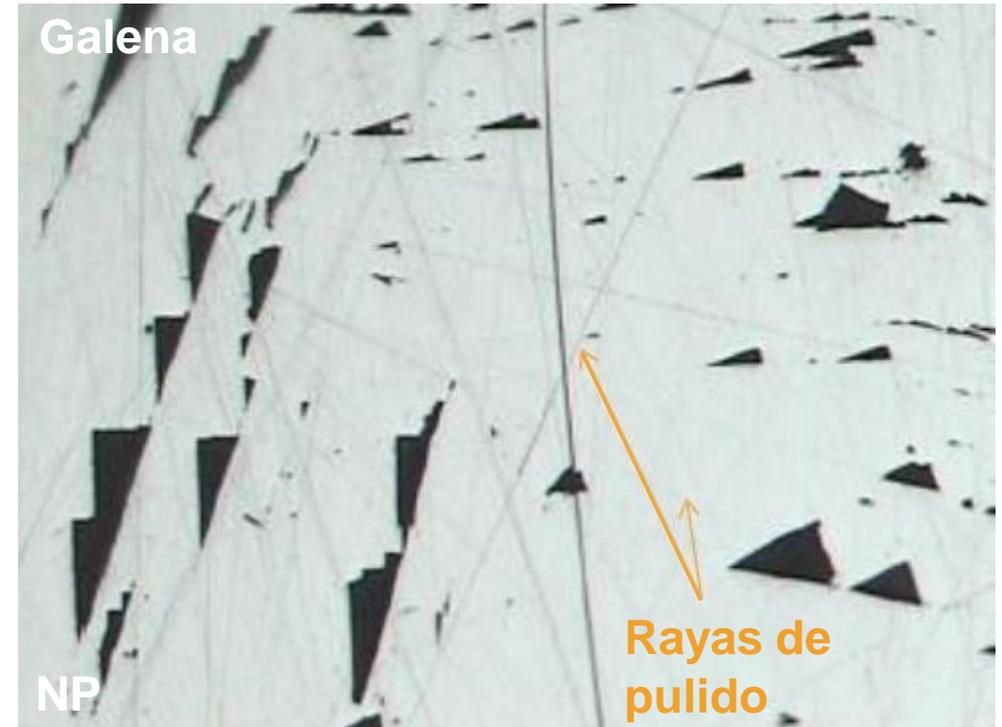
- Solo se pueden hacer **observaciones cualitativas** de la dureza del pulido.
- Los criterios utilizados para apreciar la **dureza relativa entre dos minerales** son los siguientes:
  - Rayas de pulido.
  - Relieve diferencial.
  - Línea de Kalb

# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

## Dureza:

## Rayas de pulido:

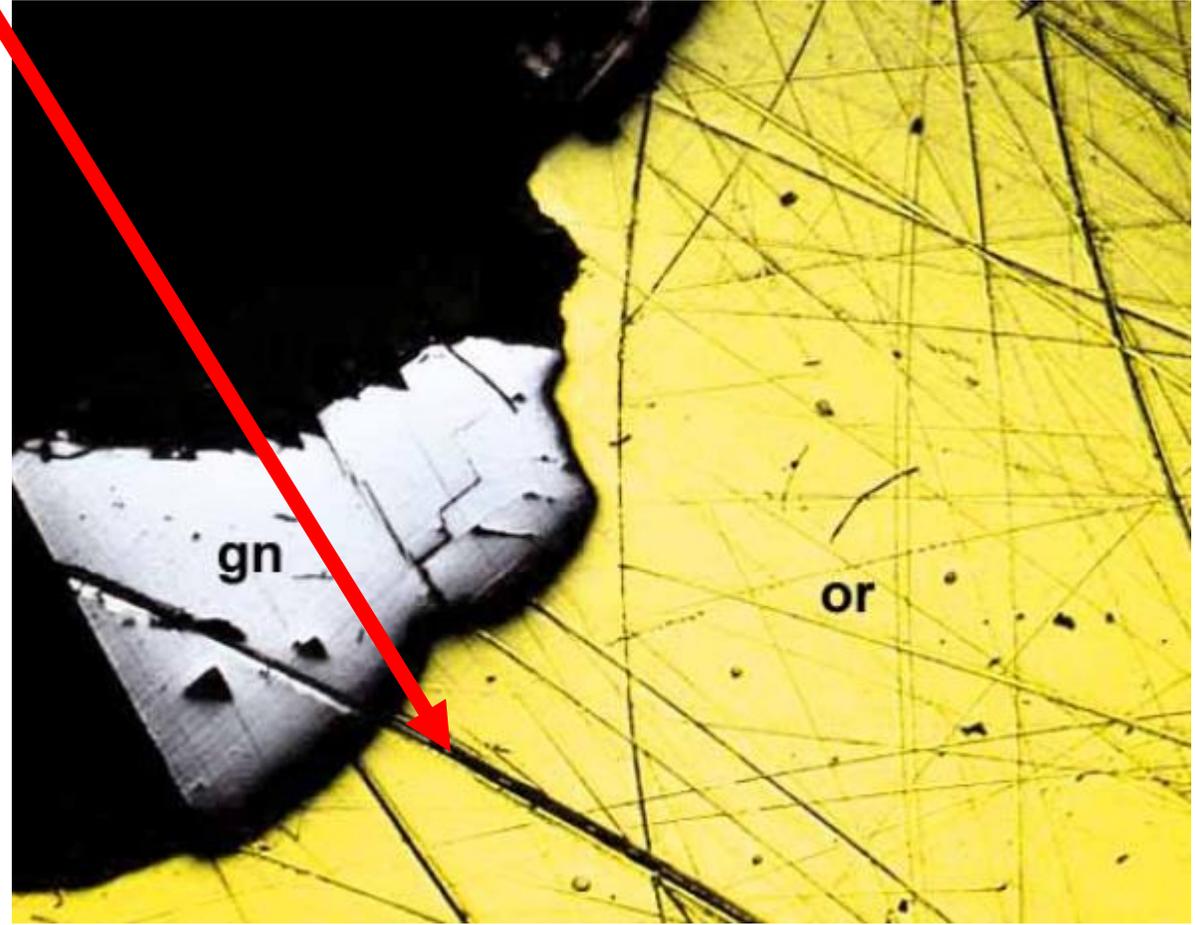
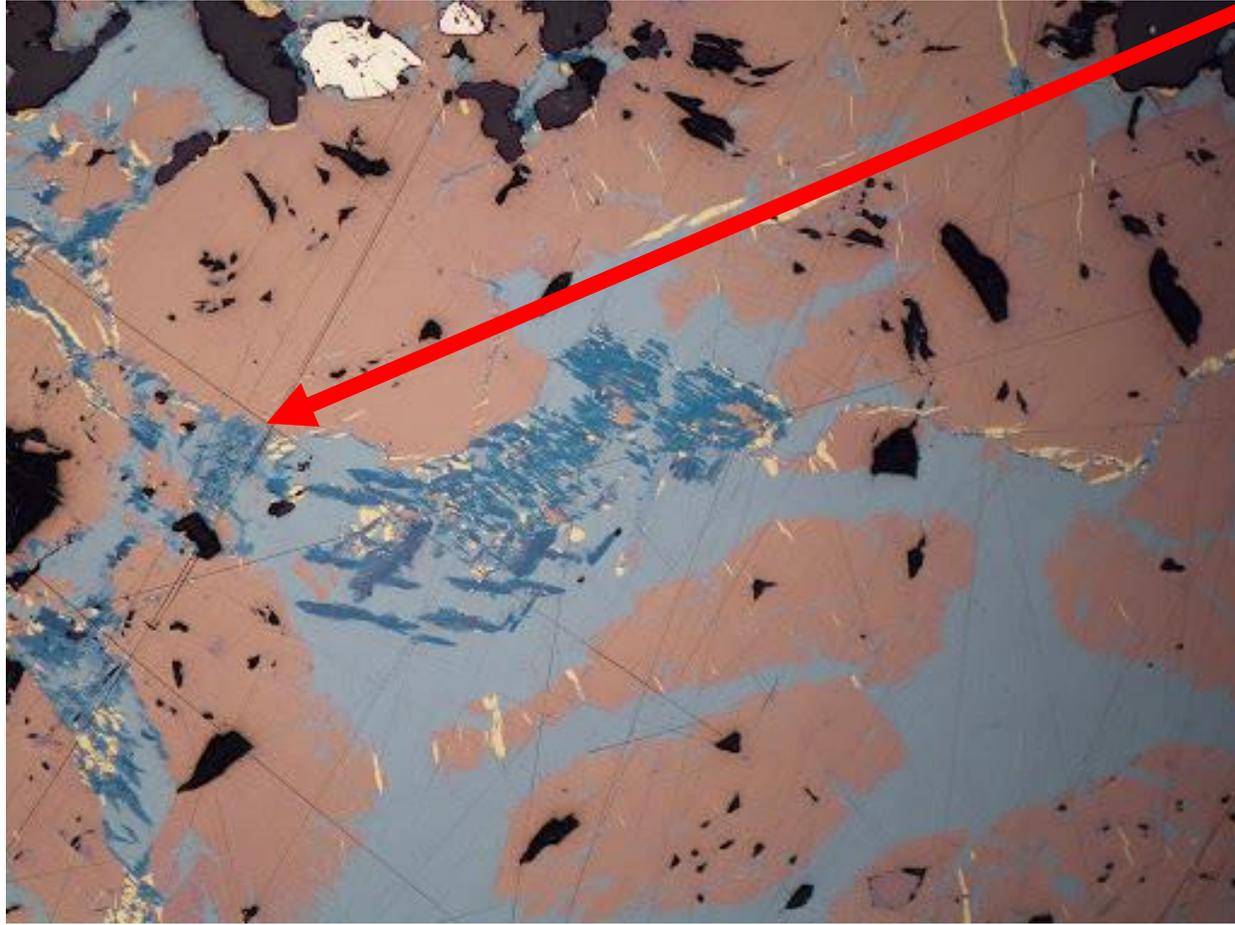
- Al pulir los minerales, los más blandos quedan con rayas debido al pulimiento.
- En algunas ocasiones en las que el **proceso de pulido no ha seguido todos los pasos en forma adecuada**, algunos **minerales muy duros (como la pirita)** pueden presentar rayas de pulido relictas → Depende del proceso de creación del corte pulido.



# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

Dureza:

Rayas de pulido

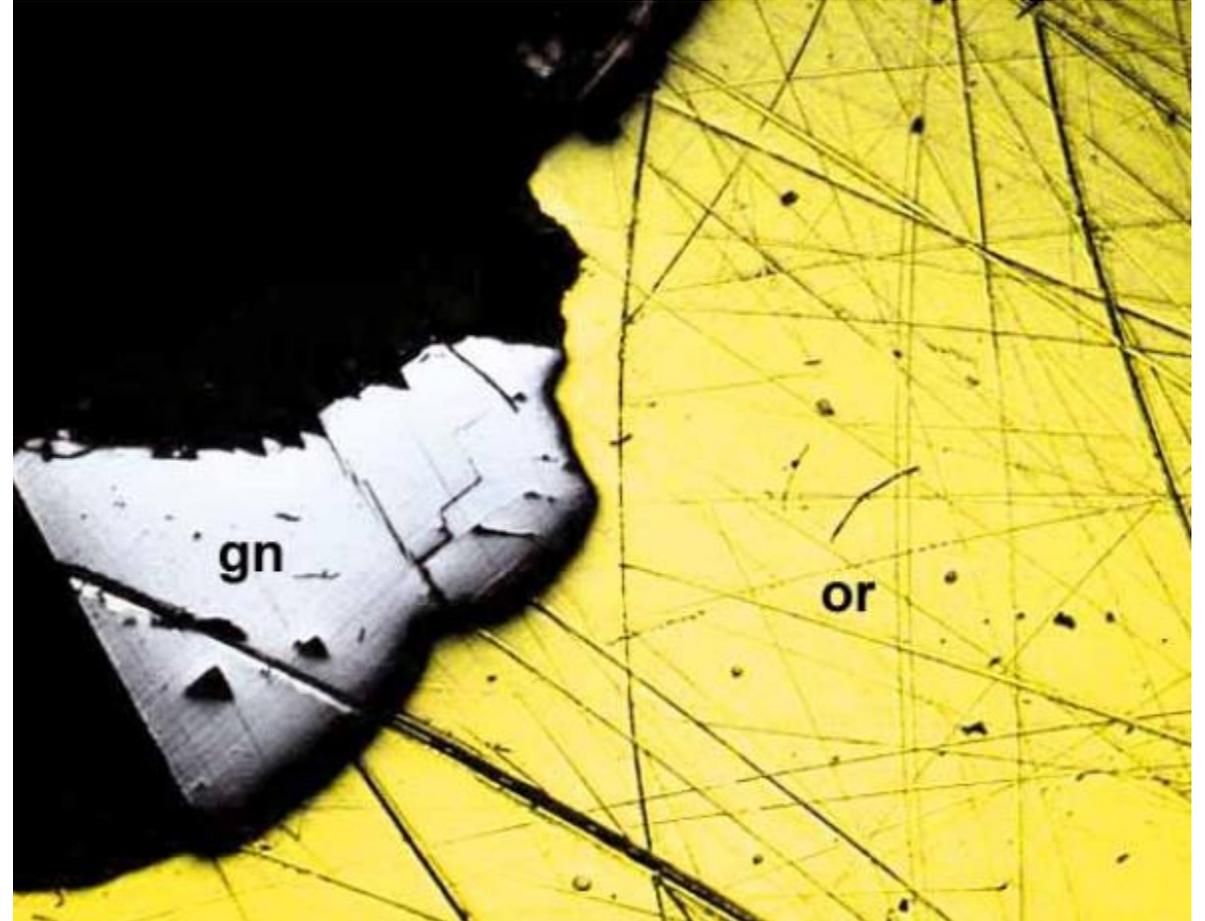


# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

## Dureza:

### Relieve Diferencial:

- **Minerales más duros ‘resaltan’ más que los blandos** → Minerales de alta dureza se ven como ‘mesetas’ y los más blandos como ‘depresiones’ → ‘sensación de profundidad entre los granos minerales’
- Minerales en contacto → contraste de relieve → línea de contacto tenue si la dureza es baja y marcada (negra), cuando la dureza es alta.



# Propiedades Ópticas – N.Paralelos

## Dureza:

### Línea de Kalb:

- Línea brillante que aparece al desenfocar levemente la imagen con el diafragma de apertura semi-cerrado. La línea se desplazará hacia el mineral de menor dureza al alejar el objetivo de la platina y viceversa.

The Kalb line moves towards the softer mineral as the stage is lowered

Dr. Bastian Asmus

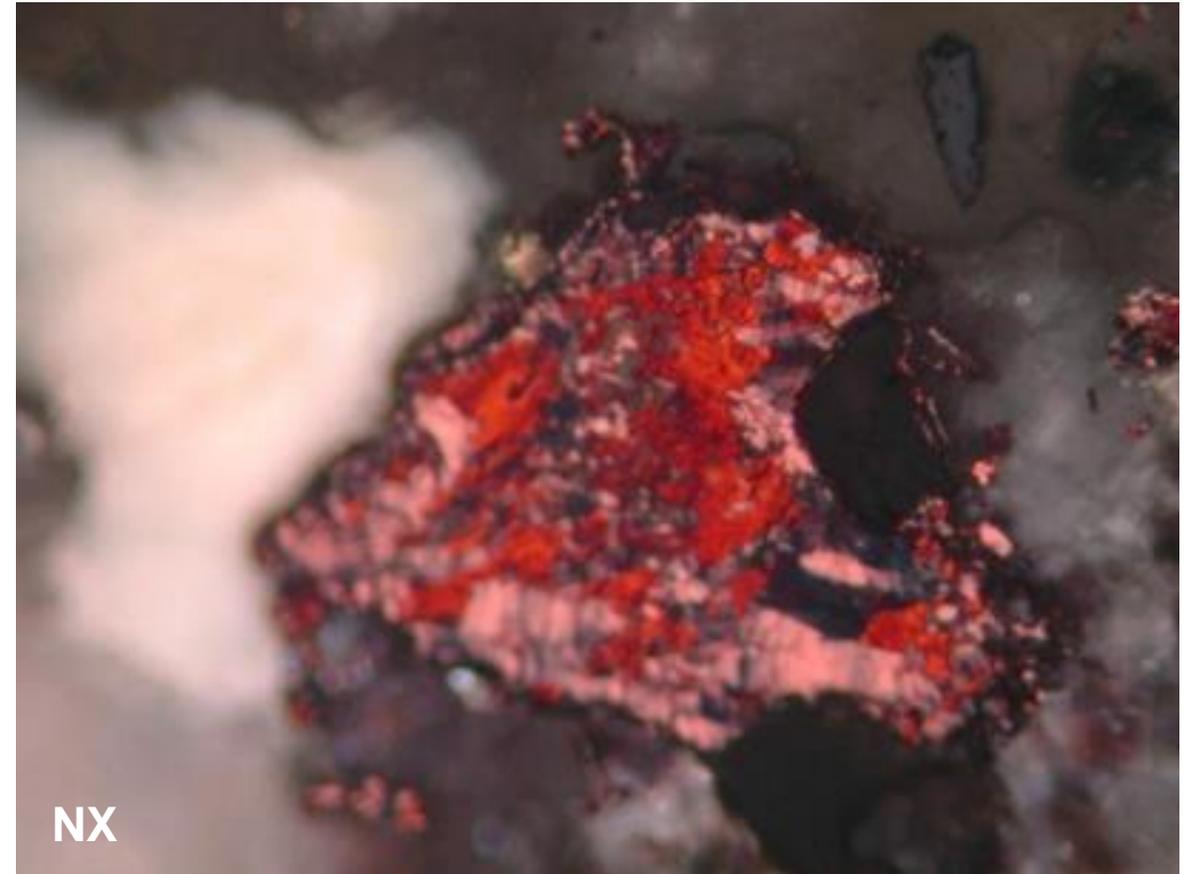
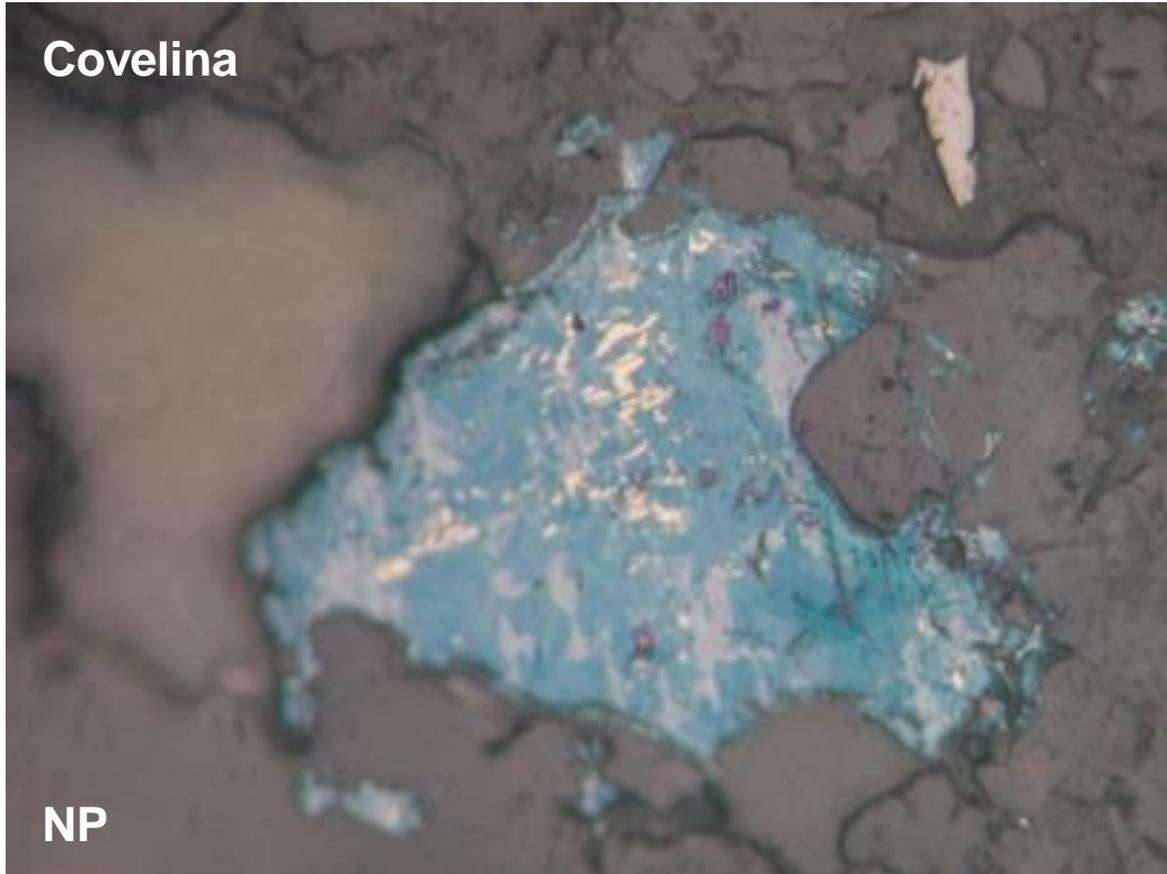
# Propiedades Ópticas – N.Cruzados

## Anisotropía:

- Propiedad que tienen todos los minerales no cúbicos de **cambiar de color al girar la platina a nícoles cruzados.**
- Resulta de la diferencia de reflectividades de dos direcciones de vibración de la luz en un cristal.
- Los colores que presentan los minerales a nícoles cruzados se denominan **colores de interferencia.**

# Propiedades Ópticas – N.Cruzados

## Anisotropía:



# Propiedades Ópticas – N.Cruzados

## Anisotropía → Medición cualitativa

- **Anisotropía fuerte:** se observa al intercalar el analizador (poner nícoles cruzados).
- **Anisotropía media:** se observa al intercalar el analizador y aumentar la iluminación.
- **Anisotropía débil:** para observarla, además de intercalar el analizador y aumentar las condiciones de iluminación, es necesario descruzar ligeramente el analizador (unos 2°).

Anisotropía	Minerales
Fuerte	<b>Covelina</b> <b>Molibdenita</b> Marcasita Niquelina
Media	<b>Hematita</b> Arsenopirita Goethita
Débil	<b>Calcopirita</b> Calcosina Bornita

# Propiedades Ópticas – N.Cruzados

## Reflejos Internos:

- Propiedad de algunos minerales de poder **reflejar luz desde su interior**.
- Ocurre en minerales semi-transparentes → **parte de la luz penetra a través del mineral reflejándose en cualquier discontinuidad interna** → planos de macla, exfoliaciones, fracturas, etc.
- Manifestación en forma de **iluminación difusa y destellos coloridos** → color de la iluminación varía según las propiedades del mineral → reflejos internos rojos, pardos, amarillos, verdes, grises y blancos.

Reflejos Internos	Minerales
Rojos	<b>Esfalerita</b> <b>Hematita</b> Cinabrio
Anaranjados	<b>Esfalerita</b> <b>Goethita</b>
Amarillos	<b>Esfalerita</b> Casiterita
Blancos	<b>Esfalerita</b>
Verdes	Oxidados de Cu

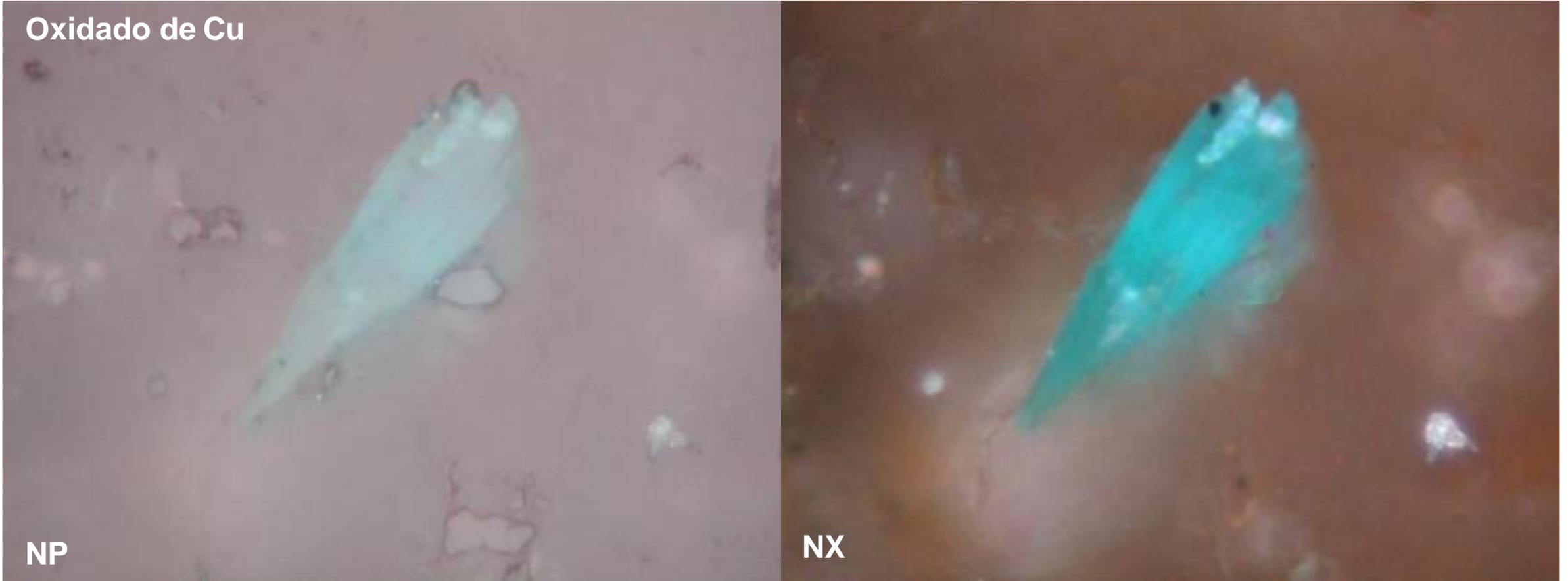
# Propiedades Ópticas – N.Cruzados

## Reflejos Internos:

Oxidado de Cu

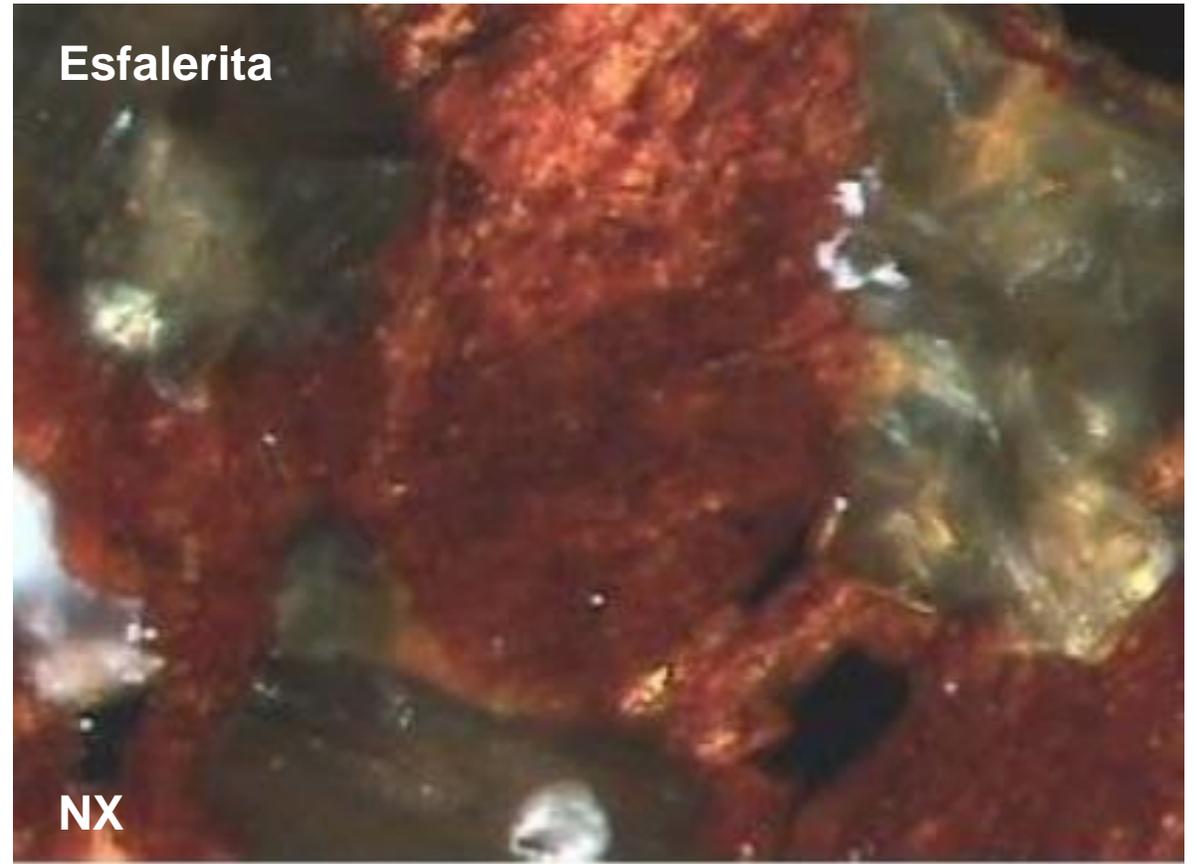
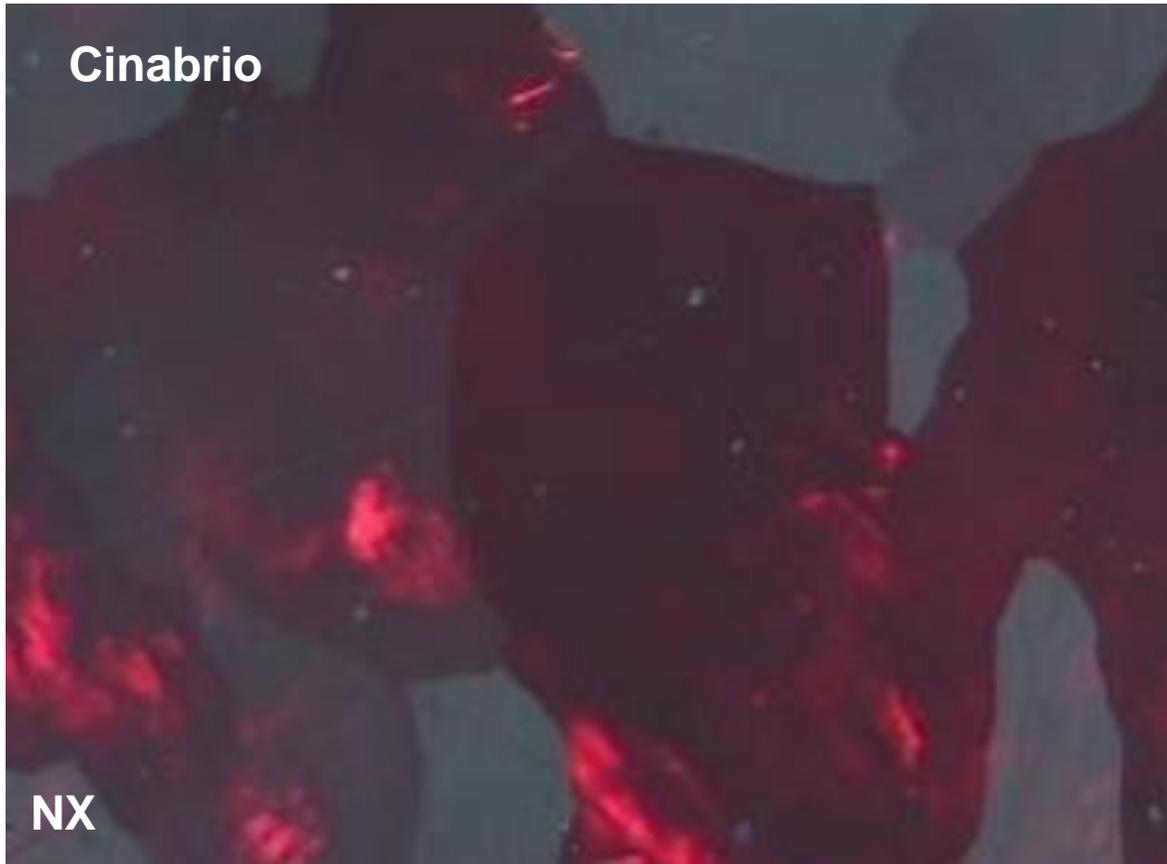
NP

NX



# Propiedades Ópticas – N.Cruzados

## Reflejos Internos:



# Propiedades Ópticas – N.Cruzados

## Maclas:

Agregado de **varios cristales minerales limitados por planos cristalográficos**. Pueden ser maclas simples, pero en muchas ocasiones son múltiples (maclas laminares).



The image shows a microscopic view of mineral grains. The grains are light-colored, possibly white or light blue, and are separated by darker, possibly black or dark blue, veins or boundaries. The overall texture is complex and layered. A large, semi-transparent circular overlay is positioned on the left side of the image, containing the word "Minerales" in a bold, black, sans-serif font. Below the text is a short horizontal line.

# Minerales

---



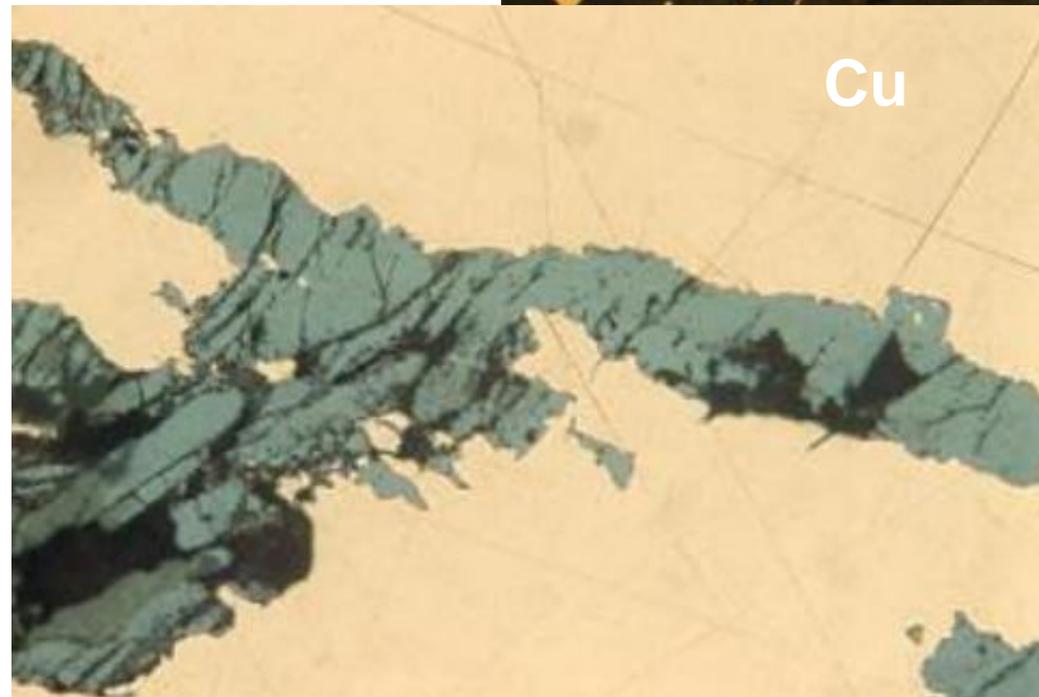
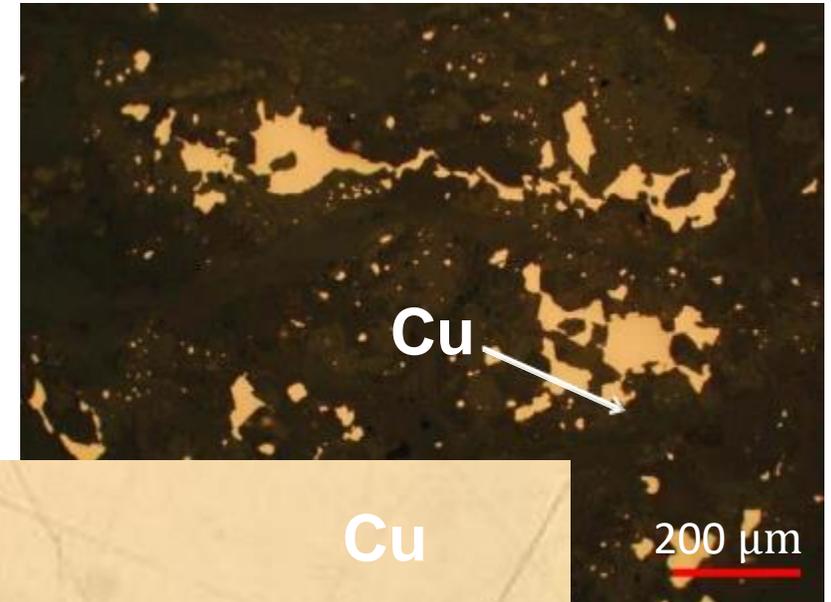
# Cobre nativo Cu

## Nícoles Paralelos:

- Color: **rosa**, se empaña a **rojo-marrón**
- Reflectividad: **alta** (60,6%).
- Dureza: **baja**.

## Nícoles Cruzados:

- Anisotropía: **isótropo**
- Se encuentra como agregados de grano grueso a fino. Ocasionalmente como cristales dendríticos o como arpones.



# Cobre nativo Cu



[Cobre-nativo-microscopio](#)



[Cobre-nativo-más-información](#)

**Native Copper**

# Cobre nativo Cu



[Cobre-nativo-microscopio](#)



[Cobre-nativo-más-información](#)

**Native Copper**

# Calcopirita $\text{CuFeS}_2$



[Calcopirita-microscopio](#)



[Calcopirita-más-información](#)

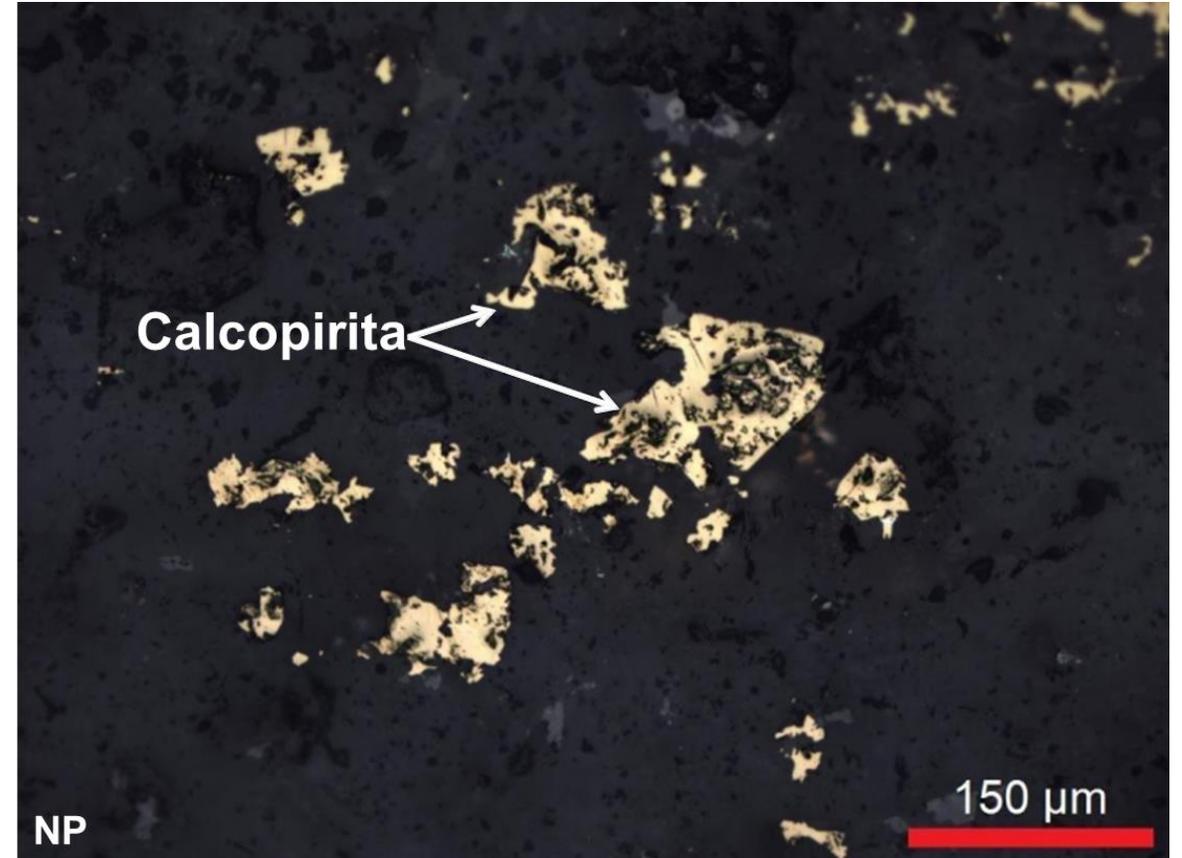
## Nícoles Paralelos:

- Color: **amarillo**
- Reflectividad: **media** (30%).
- Dureza: **baja, buen pulido** aunque a veces con rayas.

## Nícoles Cruzados:

- Anisotropía: **débil**

→ En general ocurre anhedral, diseminada y rellenando vetillas, aunque a veces como inclusiones dentro de Pirita, Esfalerita, etc.



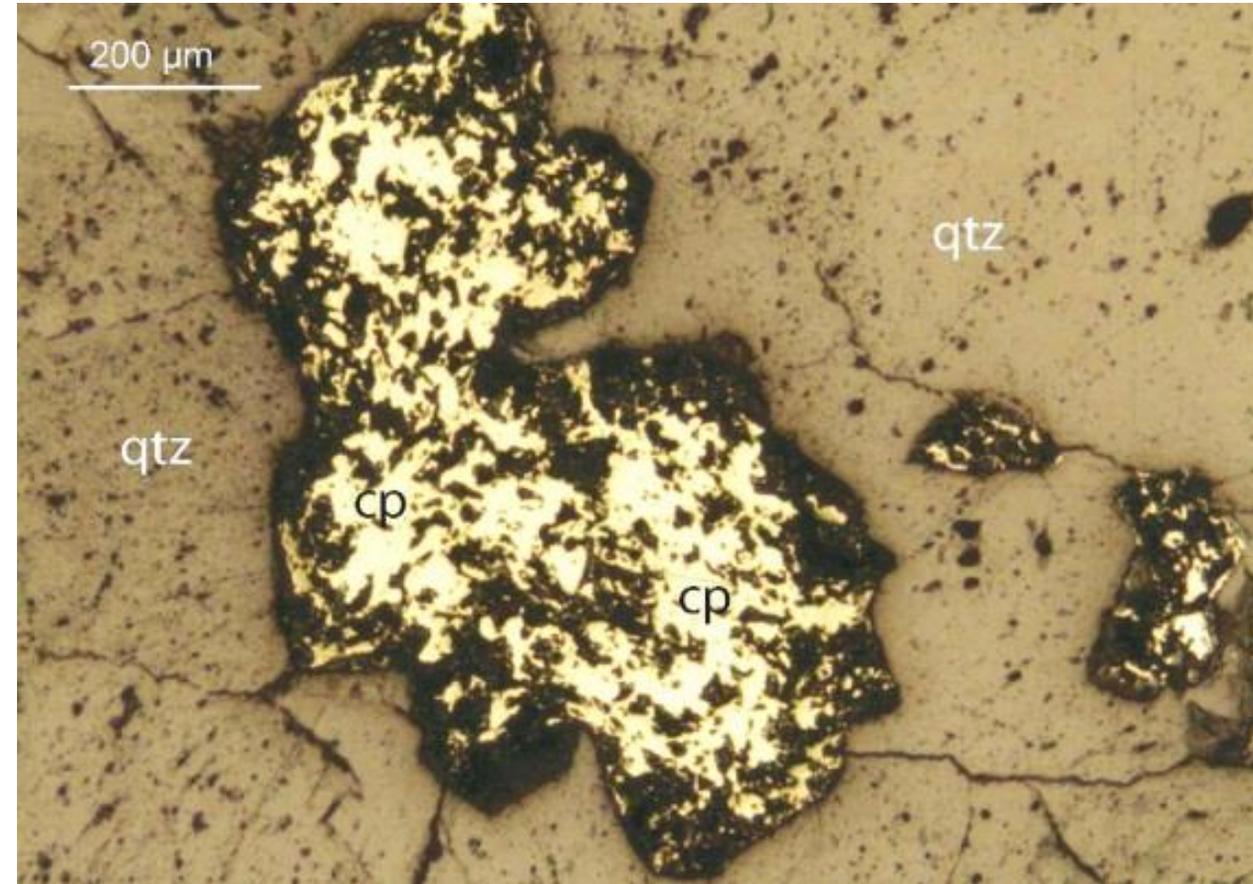
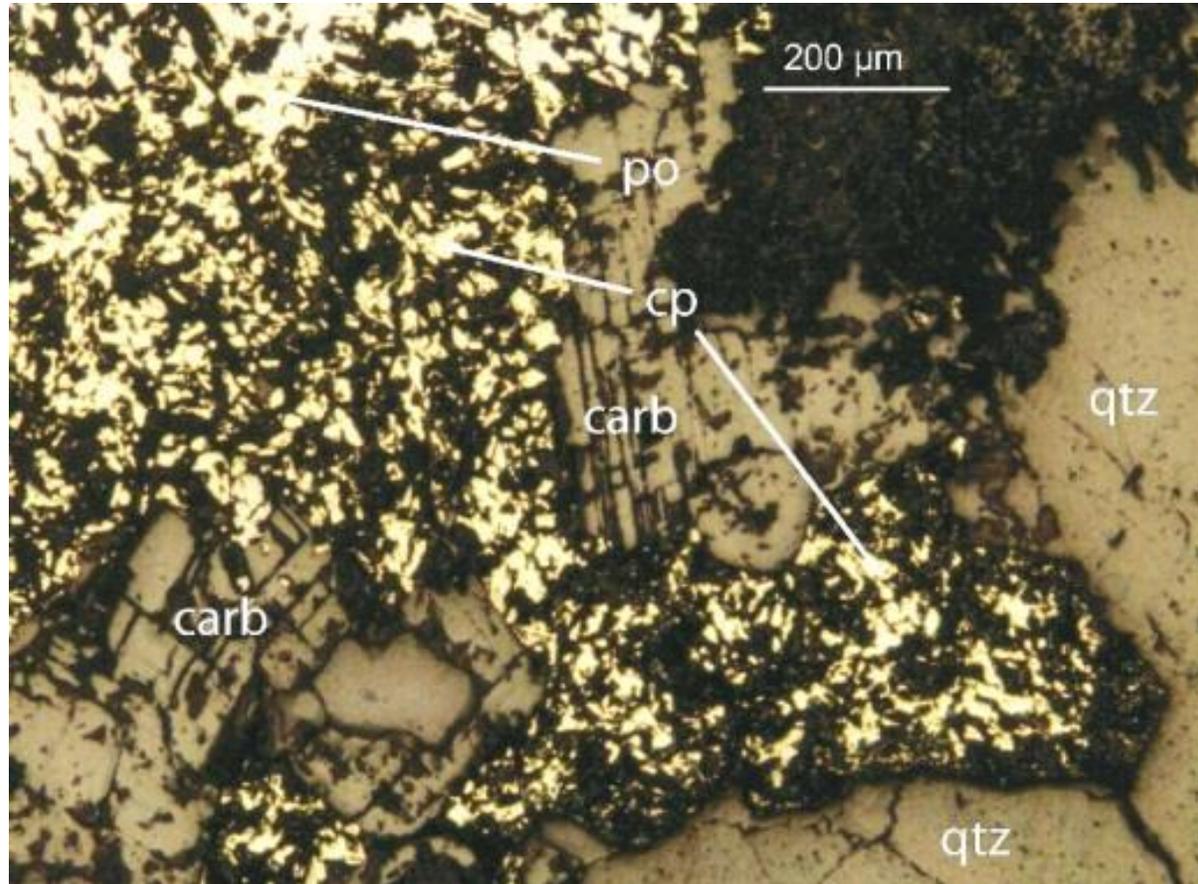
# Calcopirita $\text{CuFeS}_2$



[Calcopirita-microscopio](#)



[Calcopirita-más-información](#)



# Calcopirita $\text{CuFeS}_2$



[Calcopirita-microscopio](#)



[Calcopirita-más-información](#)

**Chalcopyrite**

# Calcopirita $\text{CuFeS}_2$



[Calcopirita-microscopio](#)



[Calcopirita-más-información](#)

**Chalcopyrite**



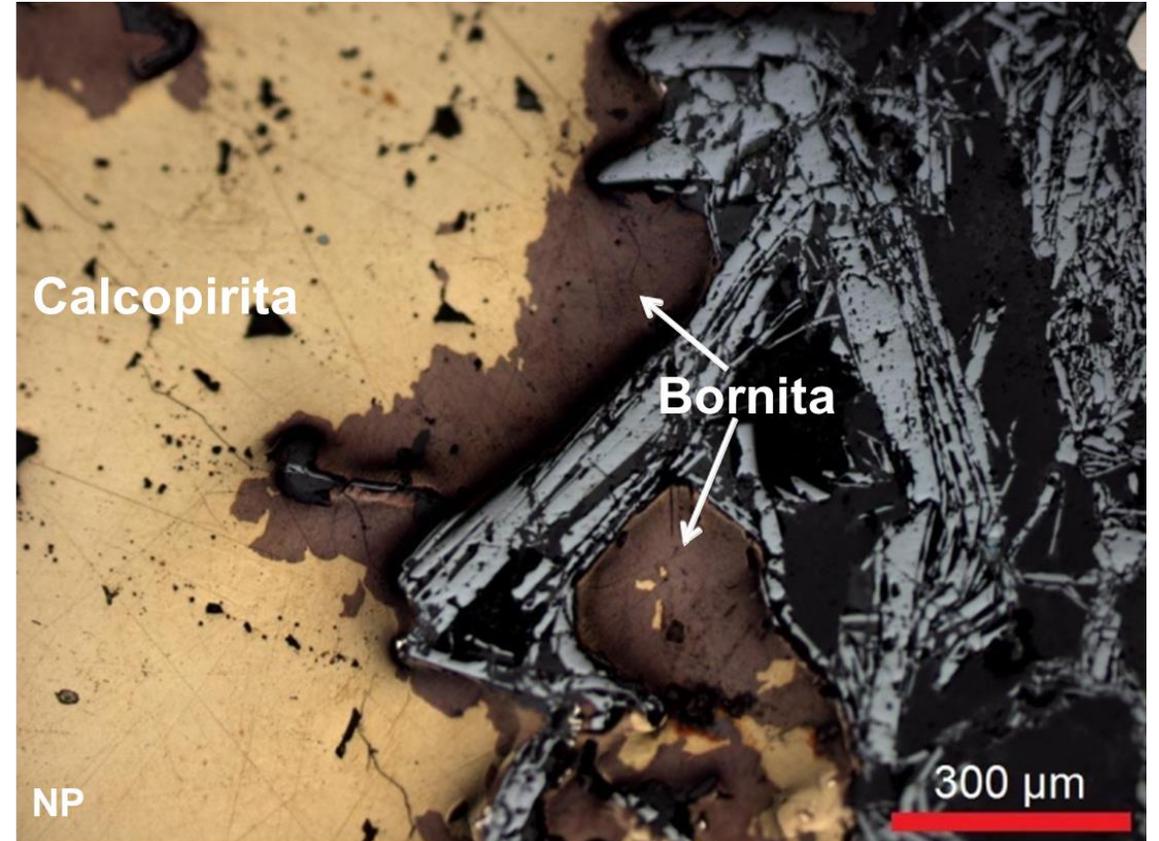
# Bornita $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$

## Nícoles Paralelos:

- Color: **rosada**
- Reflectividad: **baja** (23%).
- Dureza: **baja, buen pulido** aunque a veces con rayas.

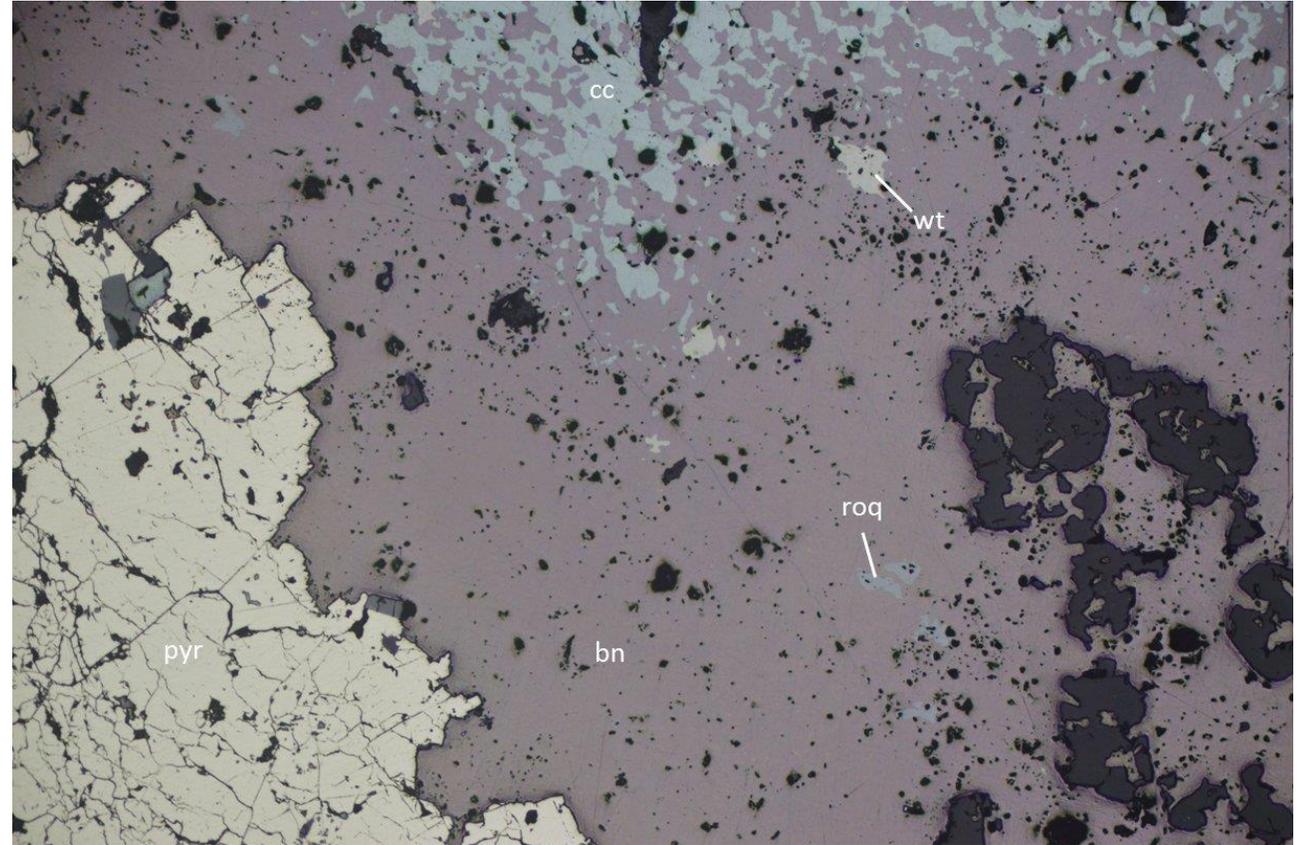
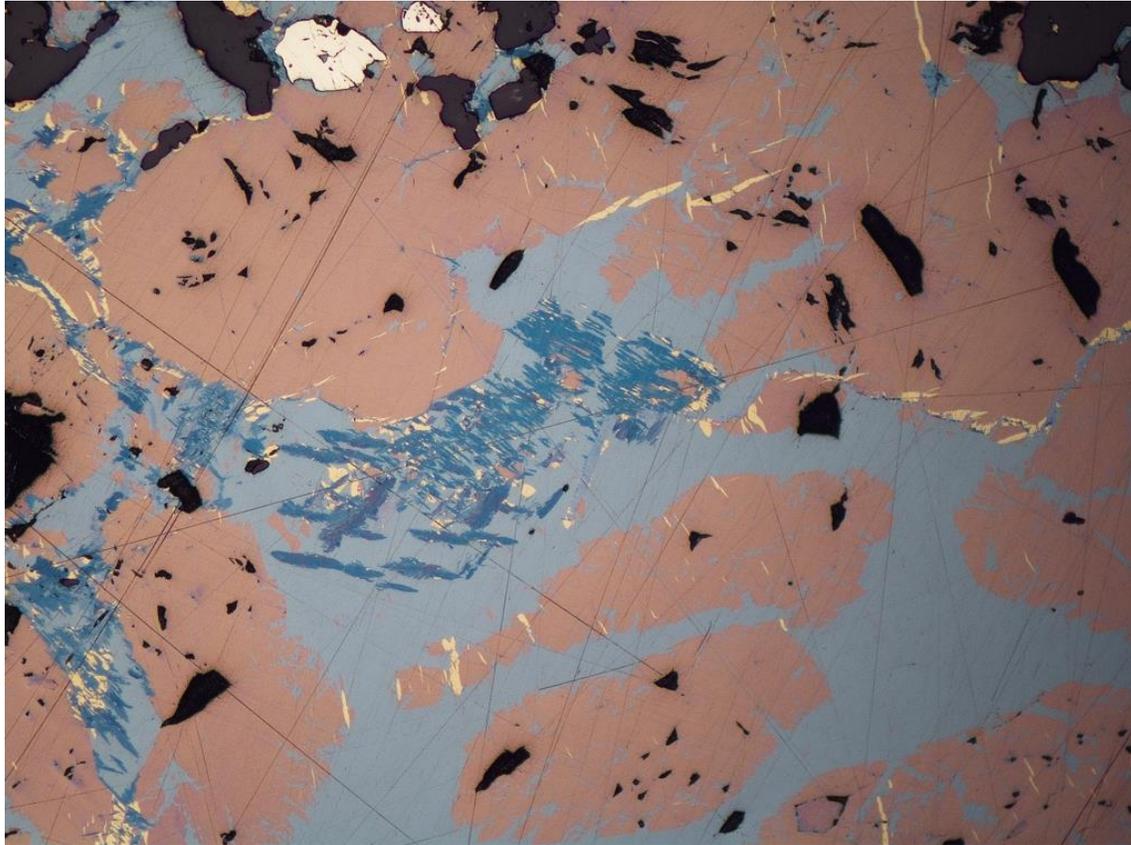
## Nícoles Cruzados:

- Anisotropía: **falsa isotropía** (sistema ortorrómbico), en ocasiones anisotropía débil.
- En general ocurre anhedral, asociada a granos de calcopirita.
- Cuando se encuentra enriquecida en Cu (reemplazada por digenita o covelina), presenta colores lila a violeta





# Bornita $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$



[Pórfido de Cu-Mo](#)

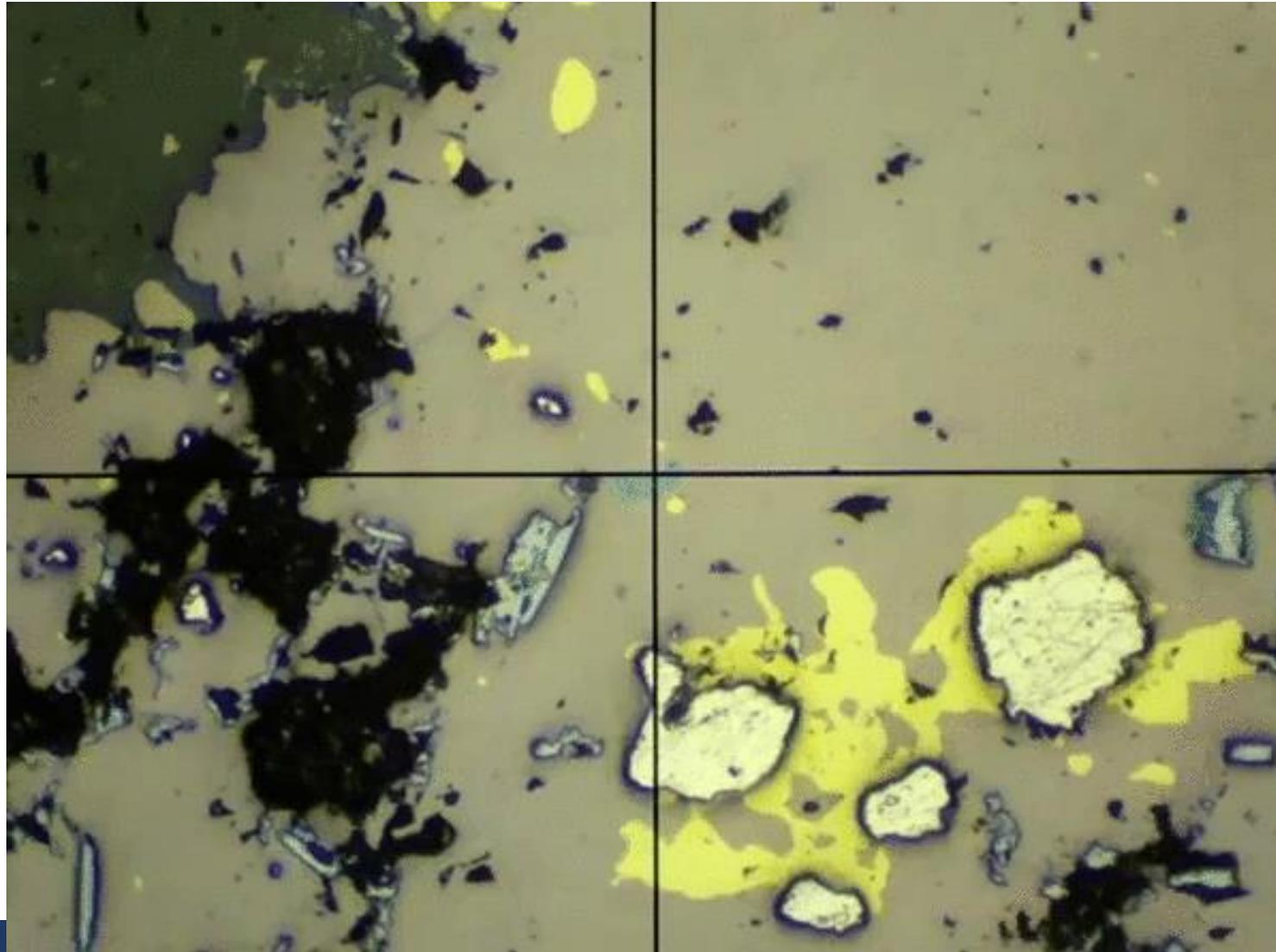


[Bornita-microscopio](#)



[Bornita-más-información](#)

# Bornita $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$





# Digenita $\text{Cu}_9\text{S}_5$

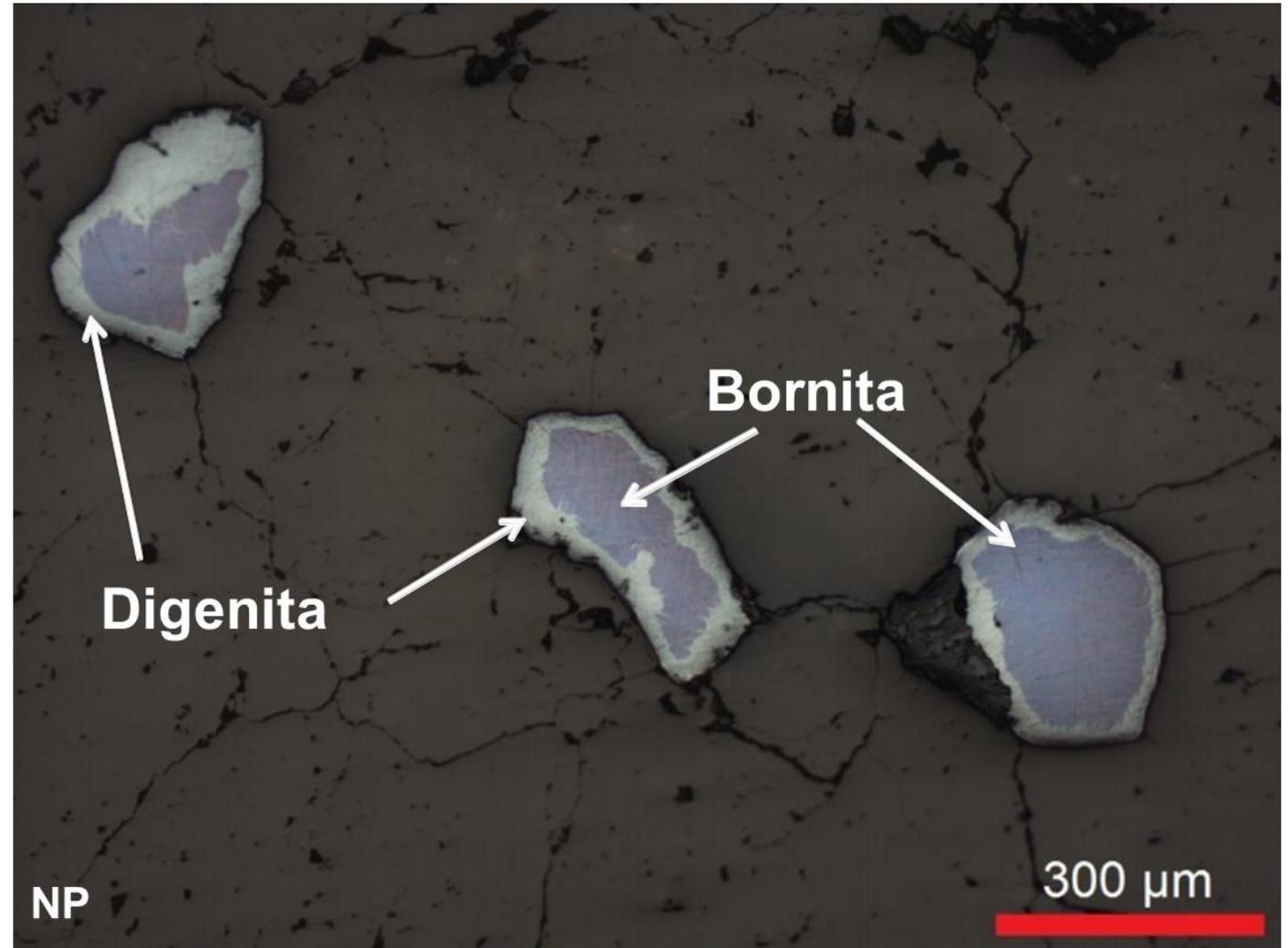
## Nícoles Paralelos:

- Color: azul grisáceo.
- Reflectividad: **media-baja** (23%).
- Dureza: **baja**
- Exfoliación: **octaédrica**.

## Nícoles Cruzados:

- Anisotropía: **isótropo**

→ Como agregados irregulares de granos anhedrales. Puede tener intercrecimientos lamelares de otros sulfuros (ccs o cv).





# Digenita $\text{Cu}_9\text{S}_5$

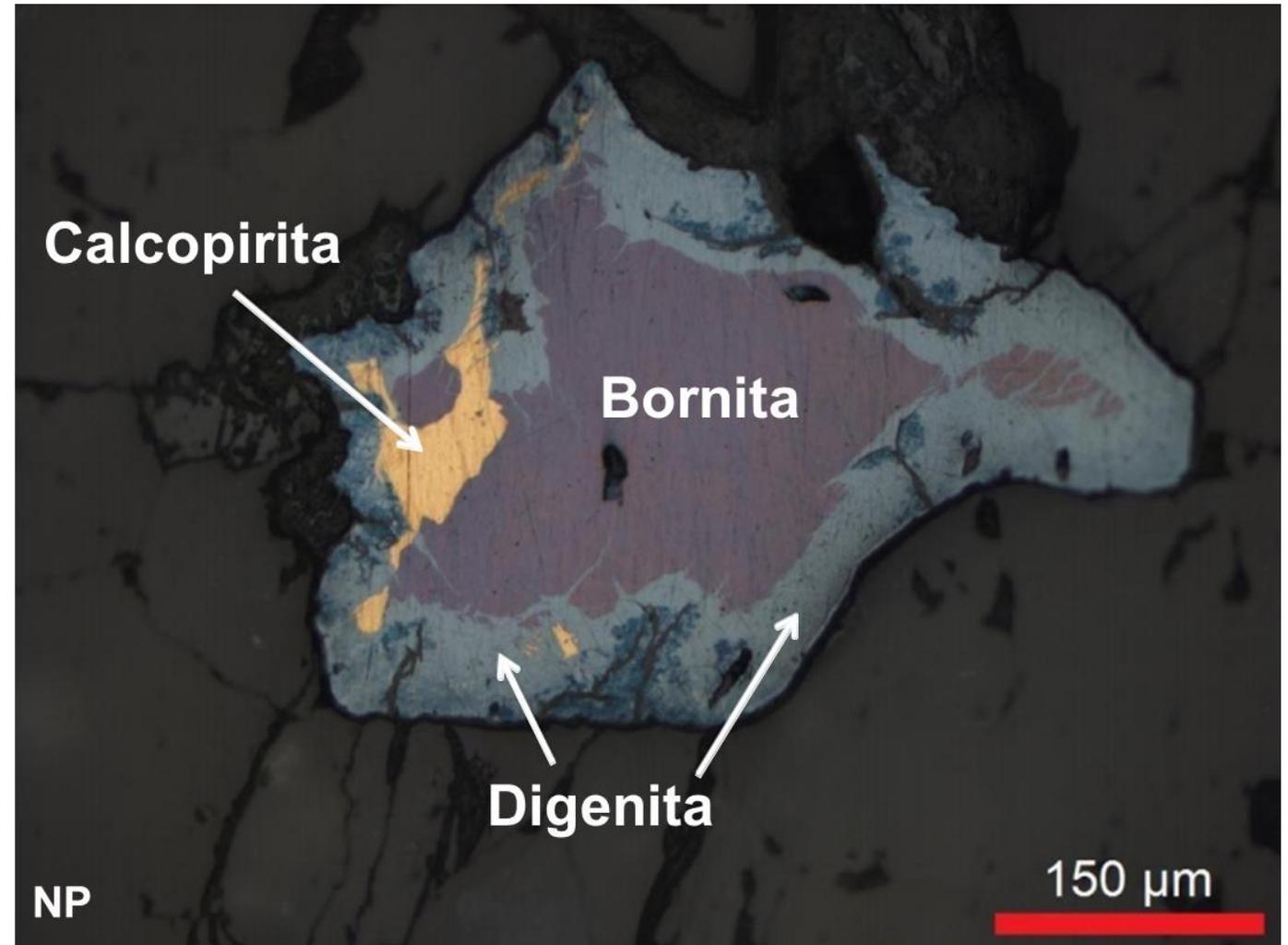
## Nícoles Paralelos:

- Color: azul grisáceo.
- Reflectividad: media-baja (23%).
- Dureza: baja
- Exfoliación: octaédrica.

## Nícoles Cruzados:

- Anisotropía: isótropo

→ Como agregados irregulares de granos anhedrales. Puede tener intercrecimientos lamelares de otros sulfuros (ccs o cv).



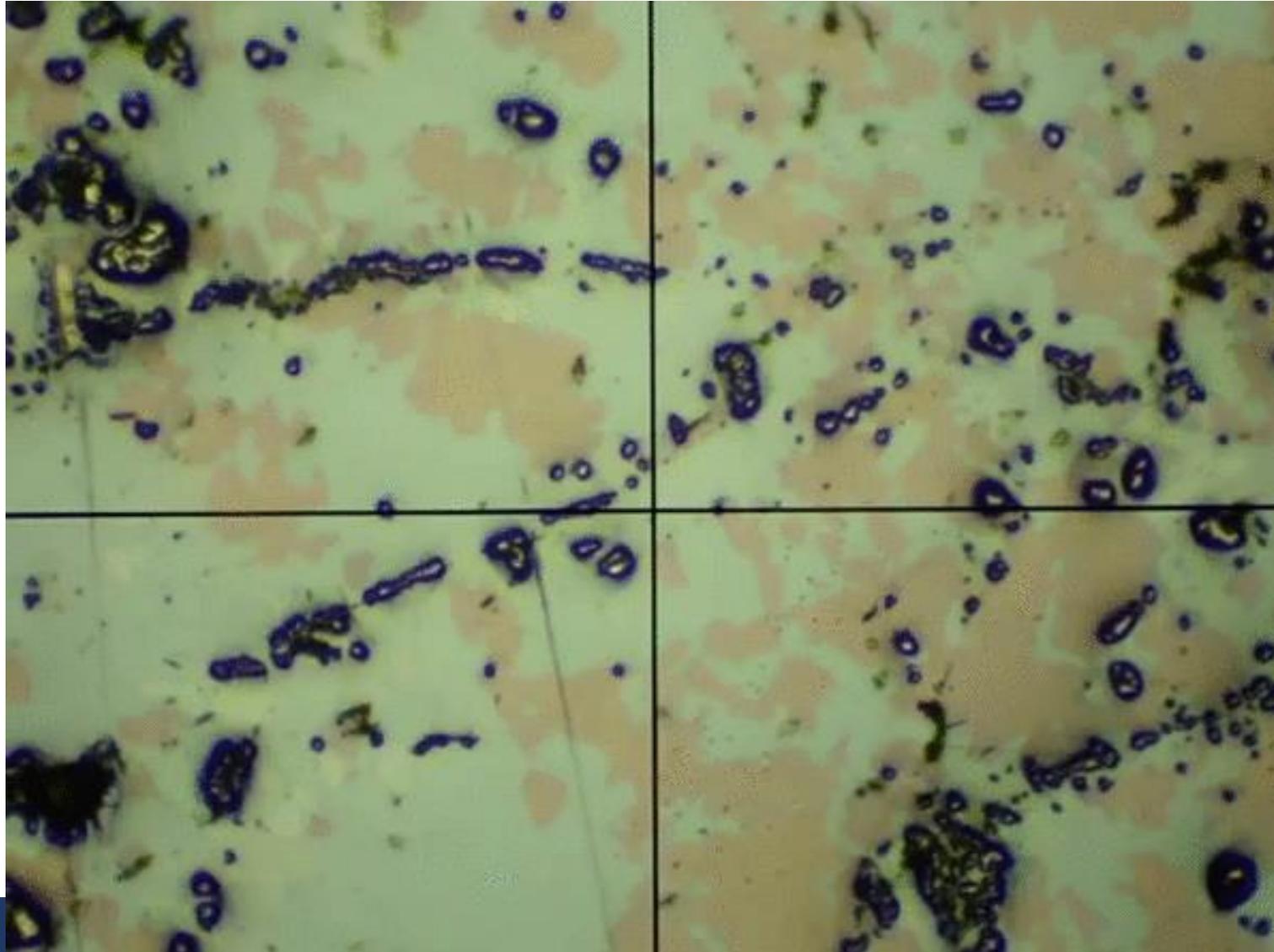
# Digenita $\text{Cu}_9\text{S}_5$



[Digenita-microscopio](#)



[Digenita-más-información](#)





# Calcosina $\text{Cu}_2\text{S}$

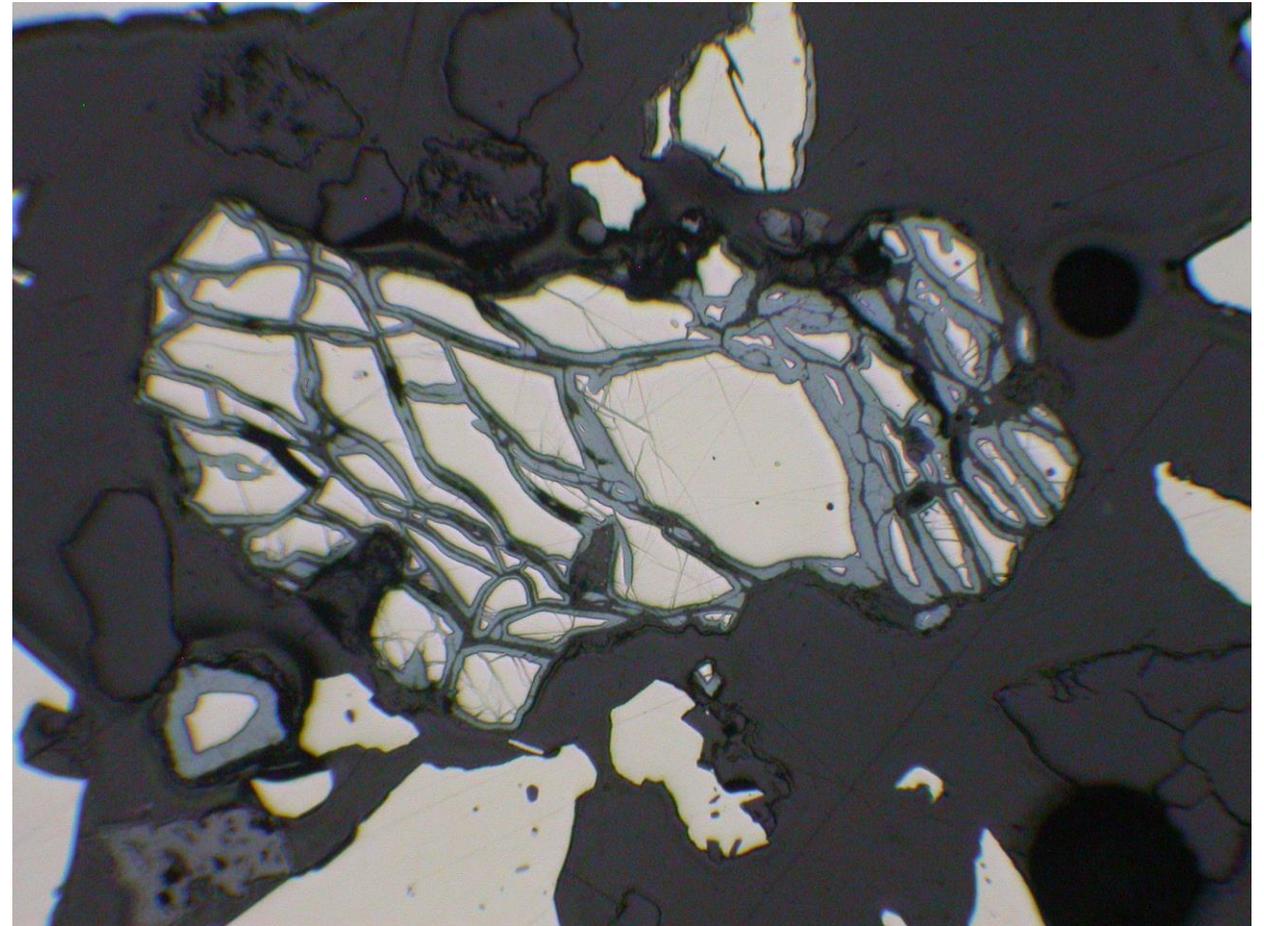
## Nícoles Paralelos:

- Color: **gris blanco a blanco azulado**.
- Pleocroísmo: **débil** a no pleocroica.
- Reflectividad: **media** (31%).
- Dureza: **baja, buen pulido** aunque casi siempre con rayas

## Nícoles Cruzados:

- Anisotropía: **débil a moderada** (verde esmeralda a rosado claro)

→ En general ocurre como reemplazo de calcopirita y bornita (enriquecimiento de Cu).



**Pirita con vetillas de calcosina**



# Calcosina $\text{Cu}_2\text{S}$

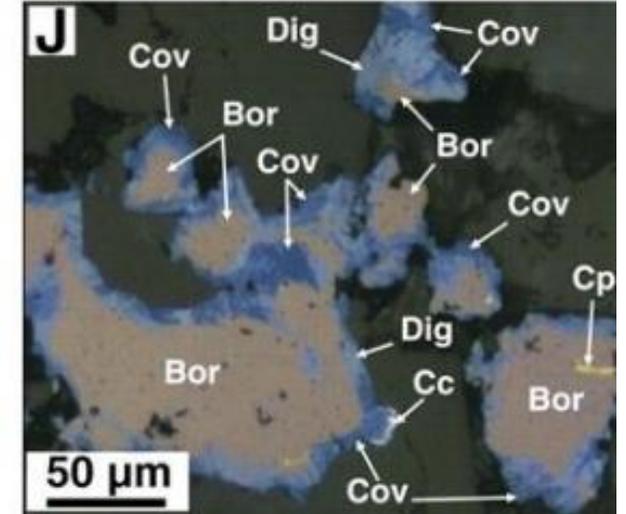
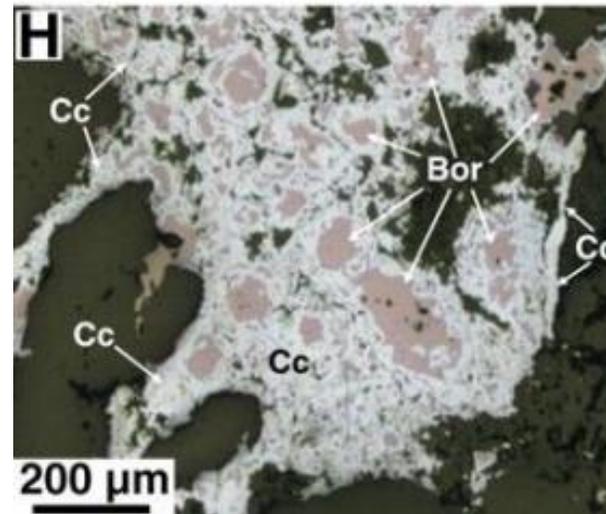
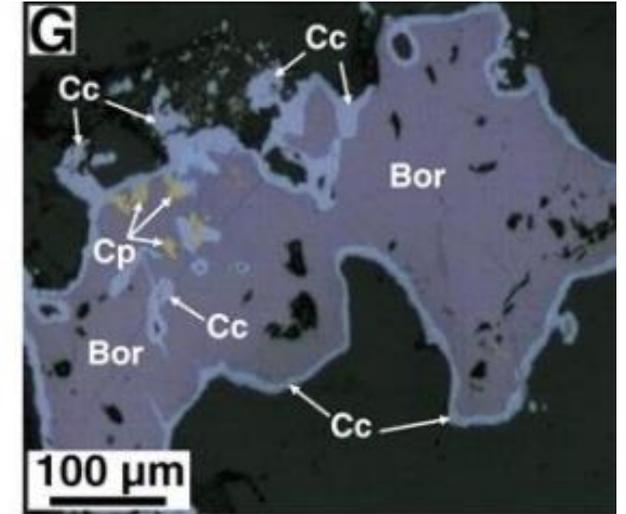
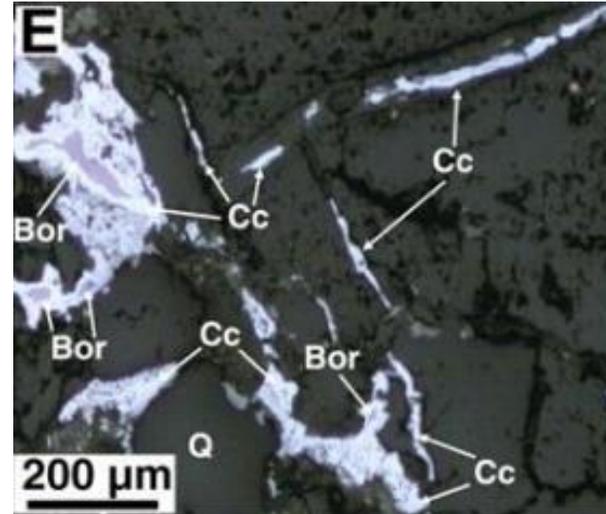
## Nícoles Paralelos:

- Color: **gris blanco a blanco azulado**.
- Pleocroísmo: **débil** a no pleocroica.
- Reflectividad: **media** (31%).
- Dureza: **baja, buen pulido** aunque casi siempre con rayas

## Nícoles Cruzados:

- Anisotropía: **débil a moderada** (verde esmeralda a rosado claro)

→ En general ocurre como reemplazo de calcopirita y bornita (enriquecimiento de Cu).



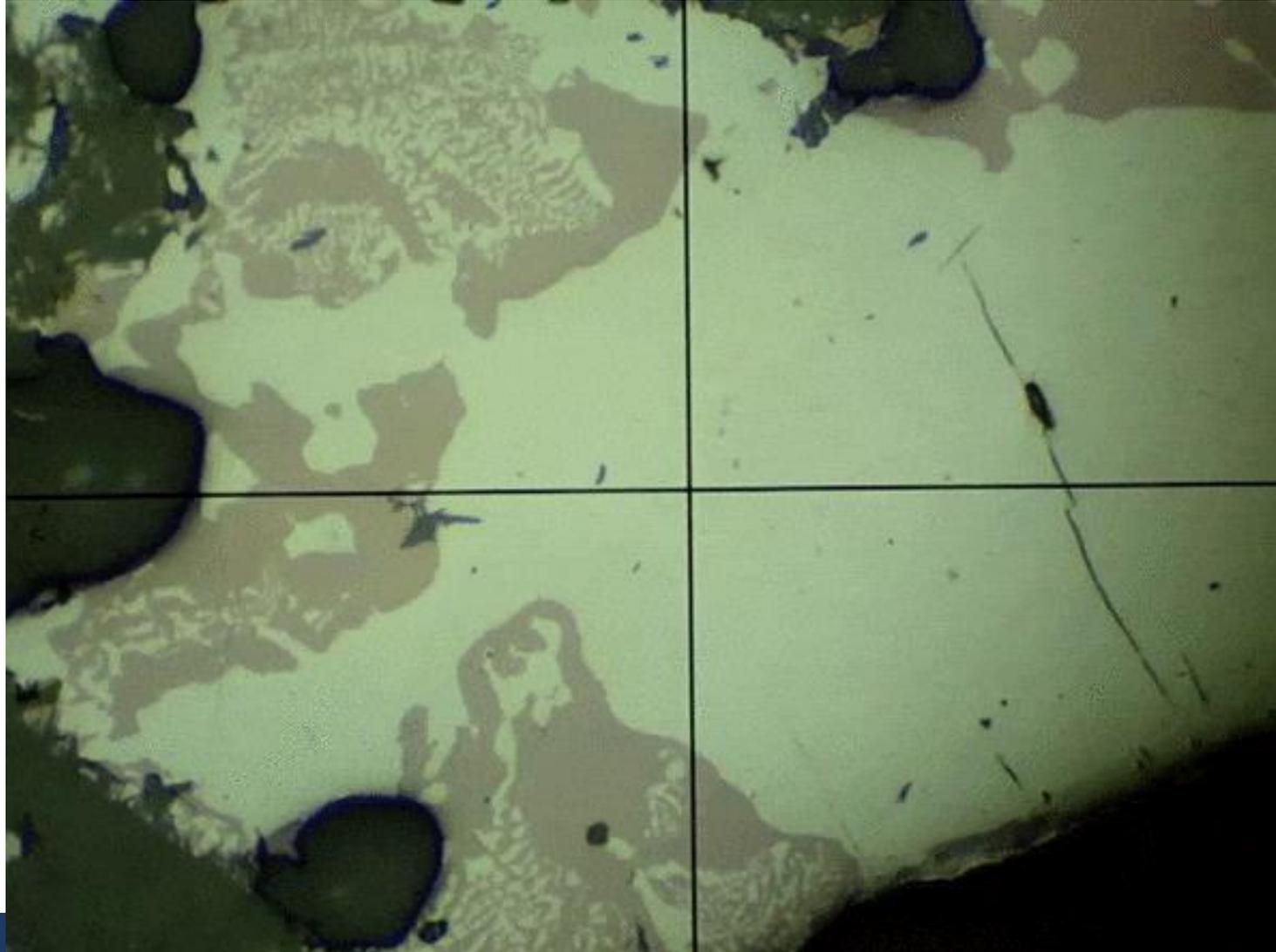
# Calcosina $\text{Cu}_2\text{S}$



[Calcosina-microscopio](#)



[Calcosina-más-información](#)



# Covelina CuS

## Nícoles Paralelos:

- Color y pleocroísmo: **azul a celeste** muy marcados. Pleocroísmo: **débil** a no pleocroica.
- Reflectividad: baja (8-23%)
- Dureza: **baja, buen pulido** aunque casi siempre con rayas.

## Nícoles Cruzados:

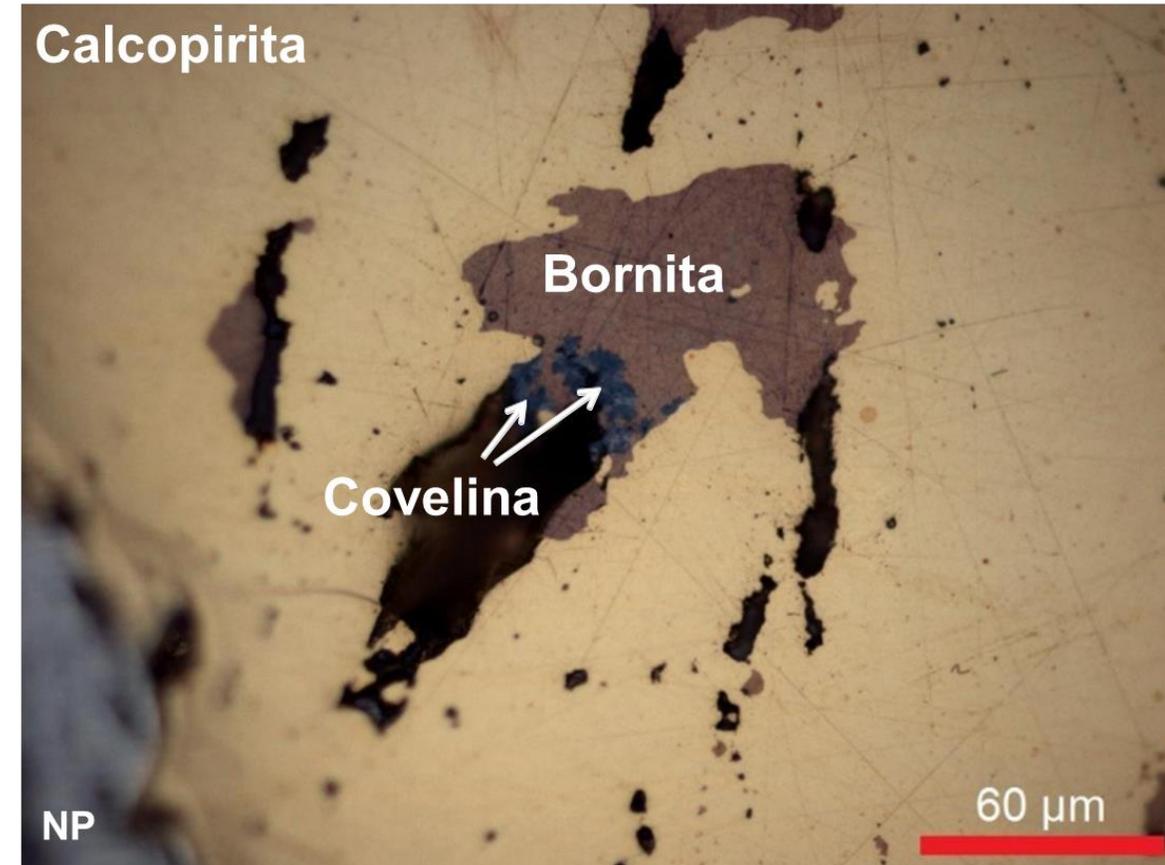
- Anisotropía: **muy fuerte** (varía de rosado pálido a anaranjado intenso). No confundir con reflejos internos
  - Reflejos Internos: **intensos color rojo.**
- En general ocurre como reemplazo de calcopirita y bornita (enriquecimiento de Cu).



[Covelina-microscopio](#)



[Covelina-más-información](#)



# Covelina CuS



[Covelina-microscopio](#)

**Covellite**

# Covelina CuS

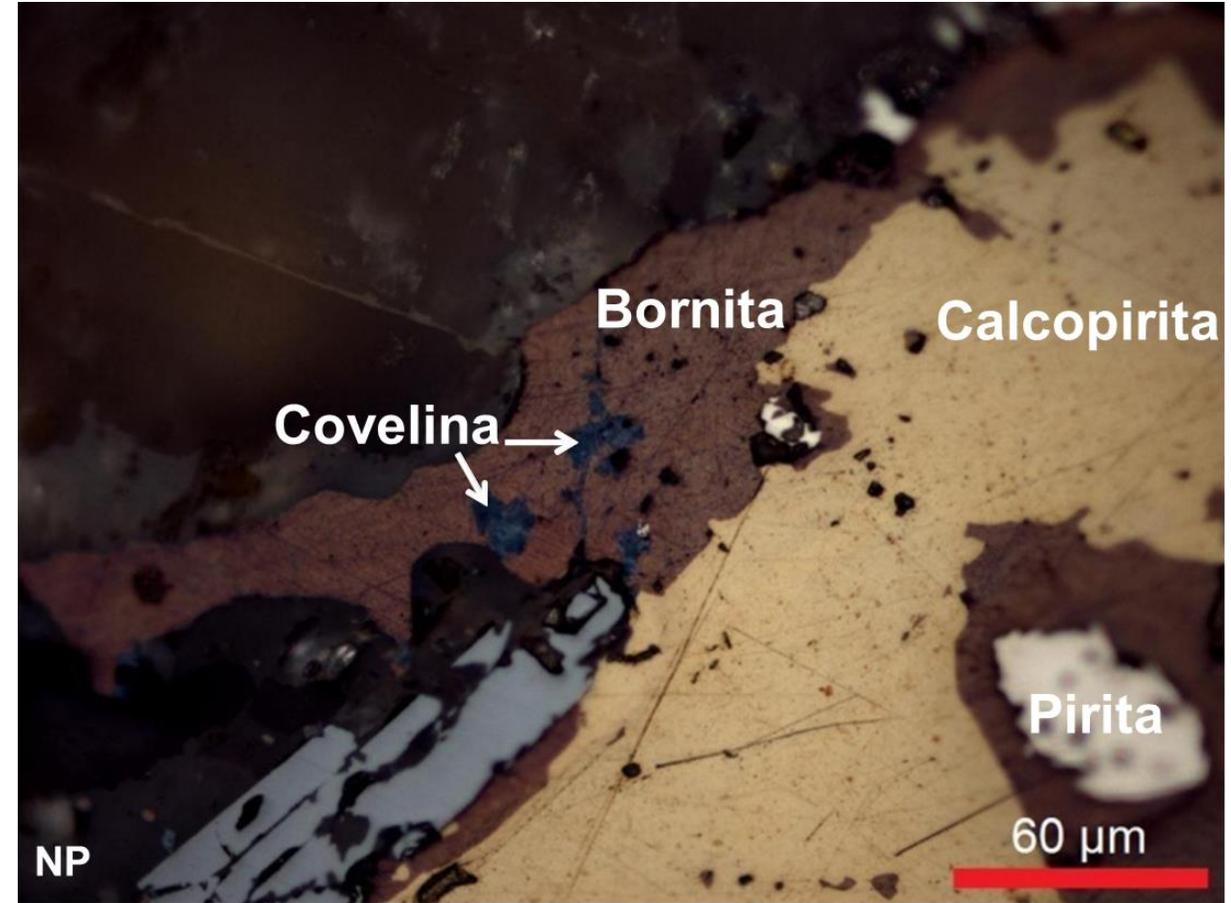
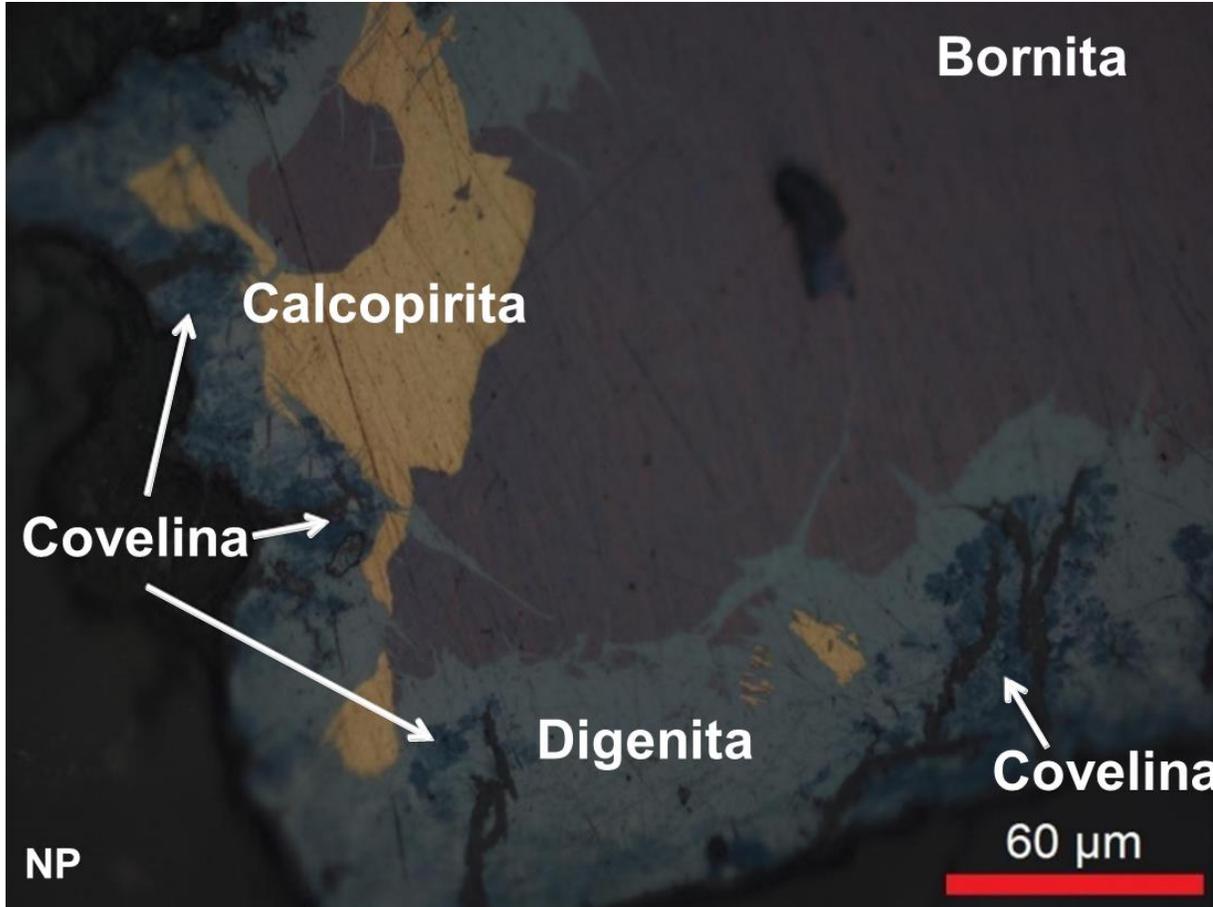


[Covelina-microscopio](#)

**Covellite**



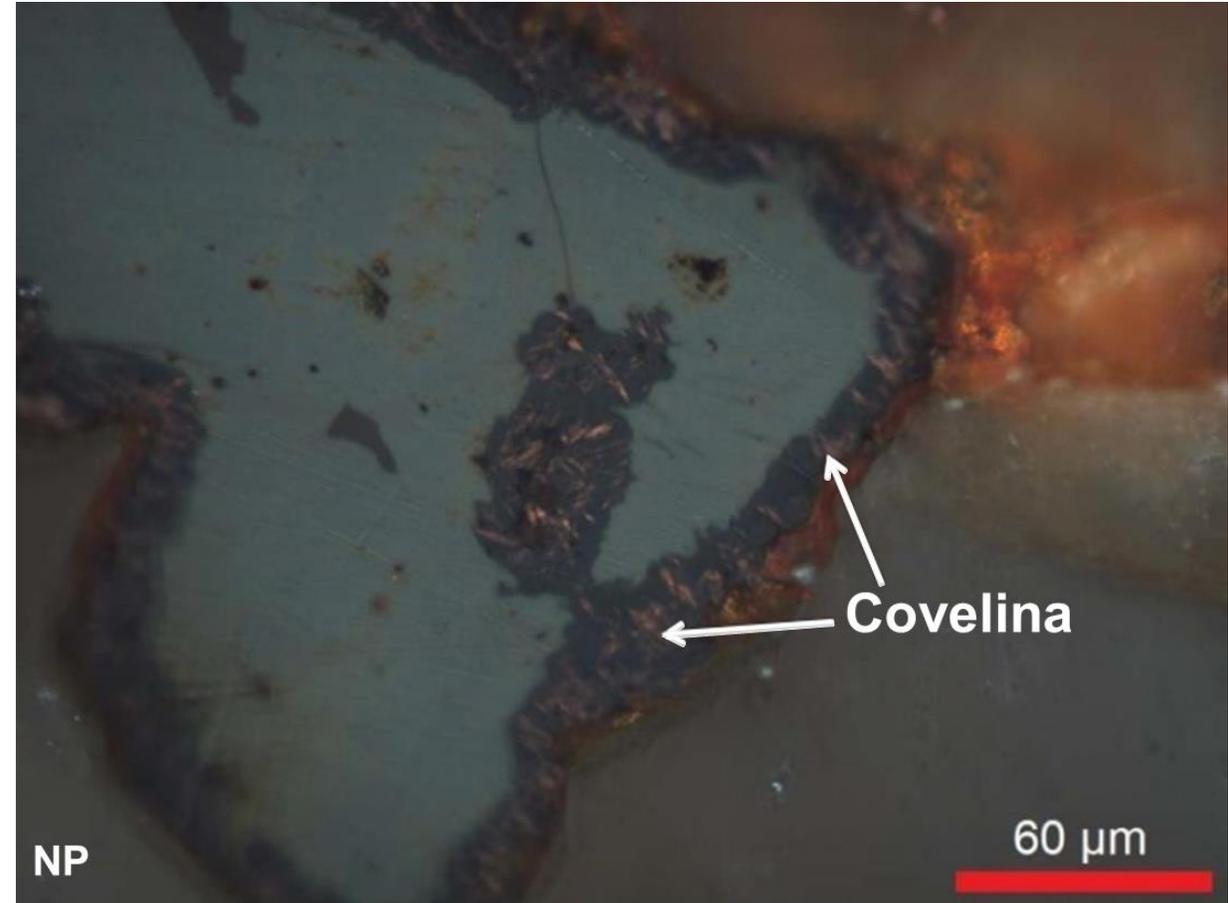
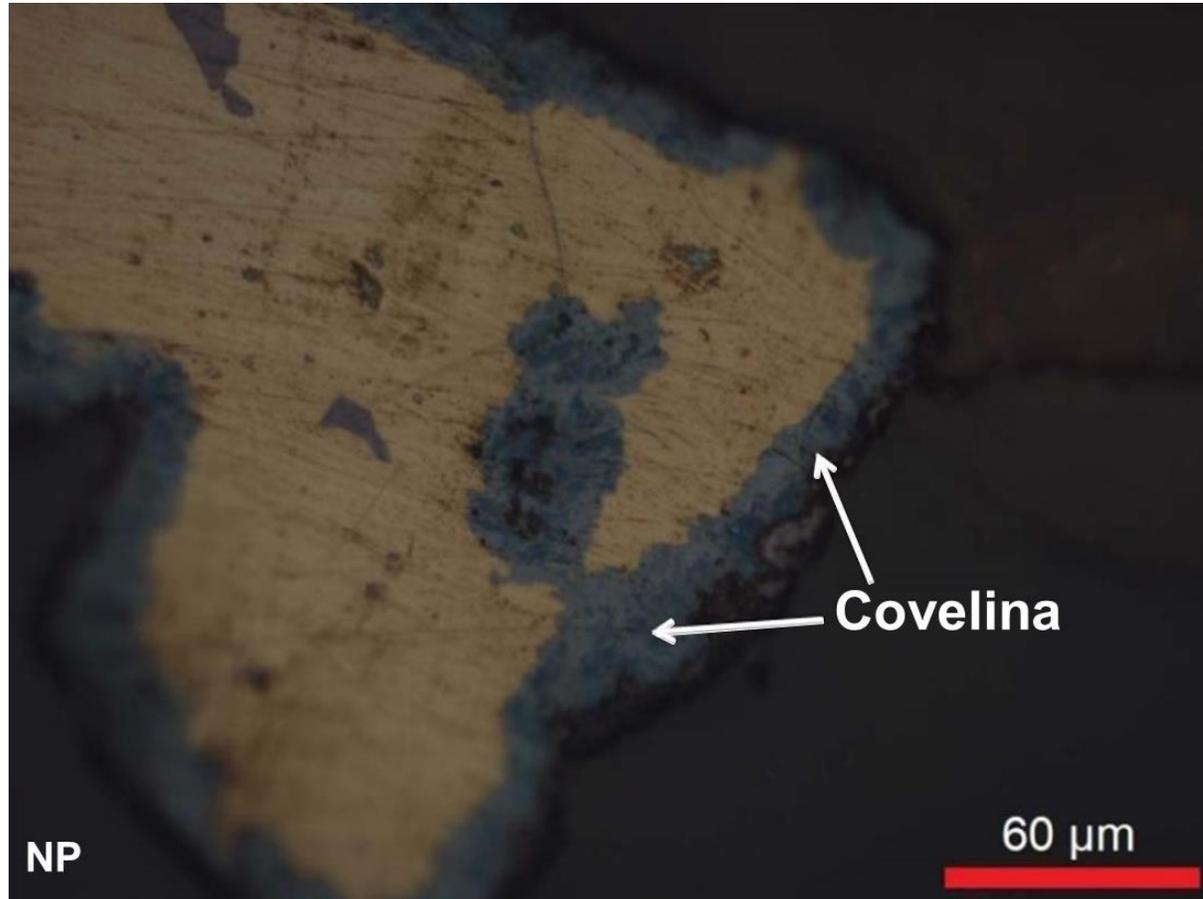
# Covelina CuS



# Covelina CuS



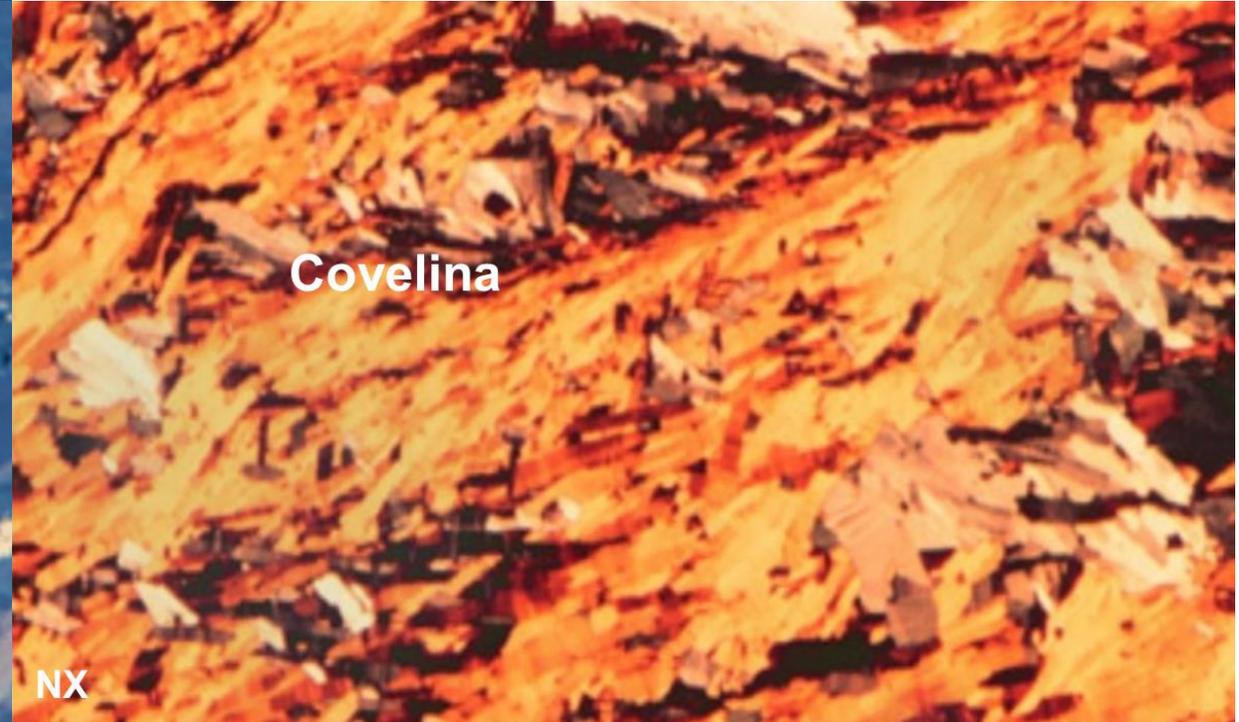
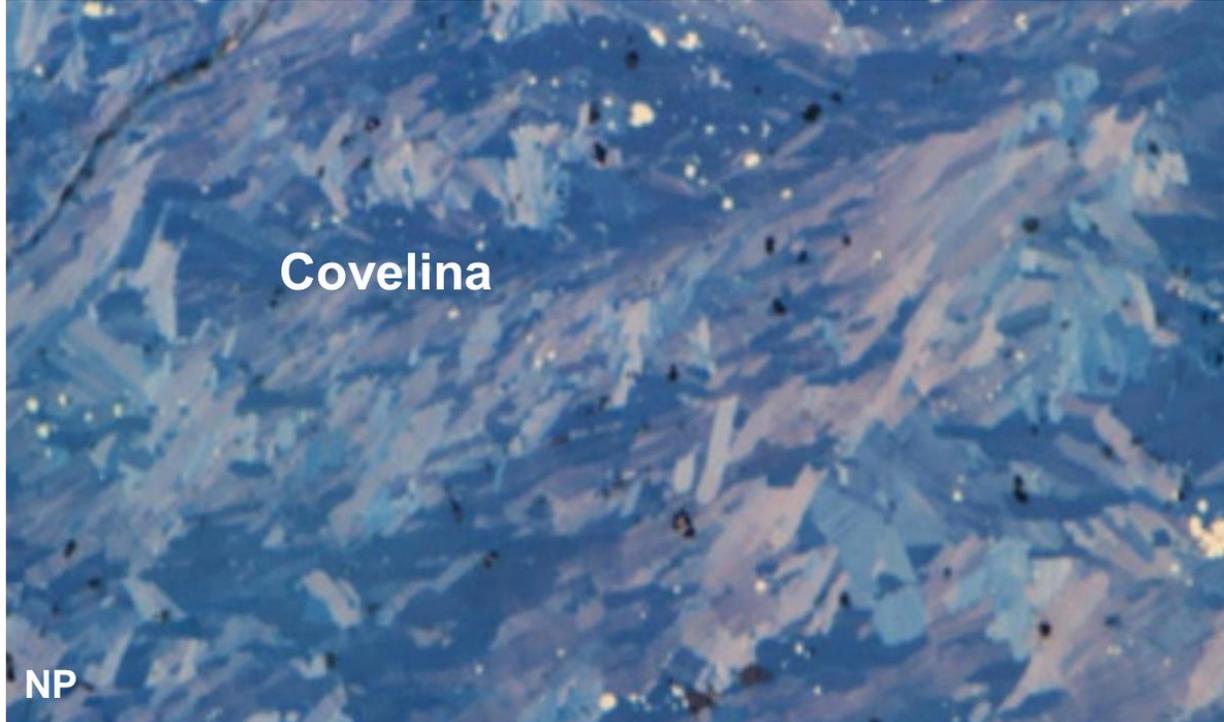
[Covelina-microscopio](#)

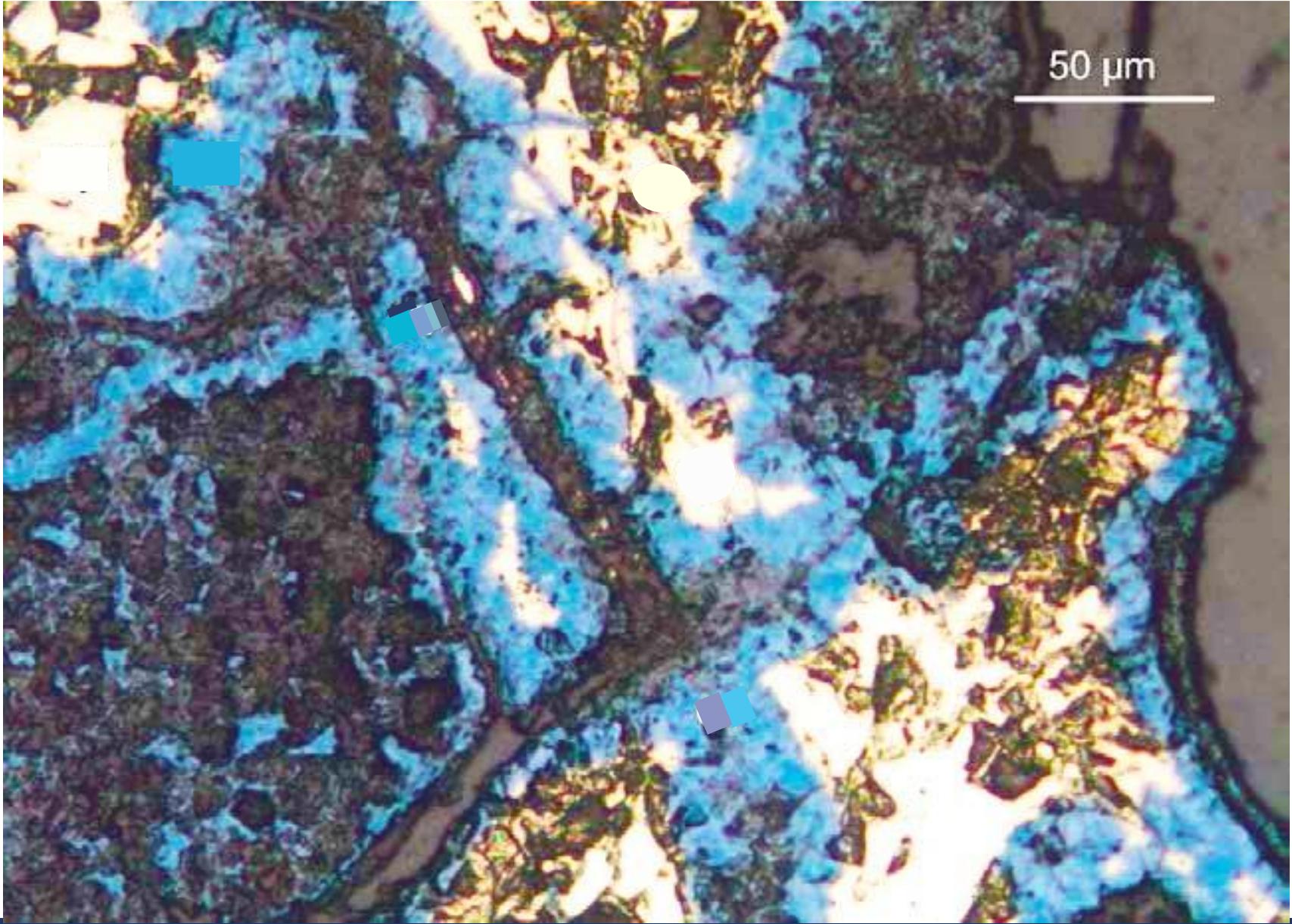


# Covelina CuS



[Covelina-microscopio](#)







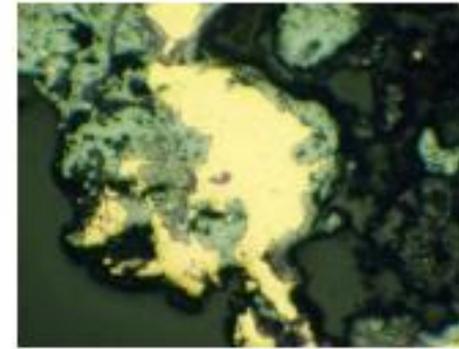
Finn

### COBRE NATIVO – Cu

ND: color rosa brillante. Neblina muy rápida, en 15 a 30 minutos. 92% de reflectividad (¡muy brillante!). Sin pleocroísmo ni birreflectancia. Siempre muchas ranuras de pulido.

NC: isotrópico, pero las ranuras siempre generan anisotropía anómala. Sin reflejos internos. Asociado con otros minerales de cobre.

*Imagen: ND, cobre (rosa), cuprita (azulada), ganga (gris oscuro).*

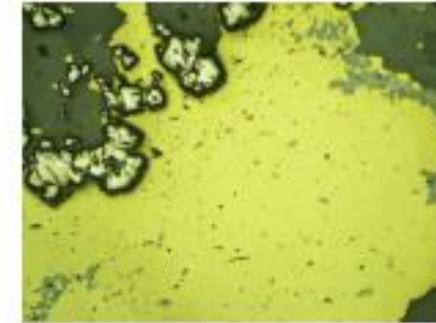


### CALCOPIRITA – CuFeS<sub>2</sub>

ND: color amarillo fuerte, puede ser verdoso, sin pleocroísmo. 39% de reflectividad, sin birreflectancia. Muchos surcos.

NC: muy oscuro, con anisotropía de color marrón a azulado débil. Sin reflejos internos. Presenta maclas lamelares azul gruesa / irregular.

*Imagen: ND, calcopirita (amarillo), pirita (crema), ganga (oscuro).*

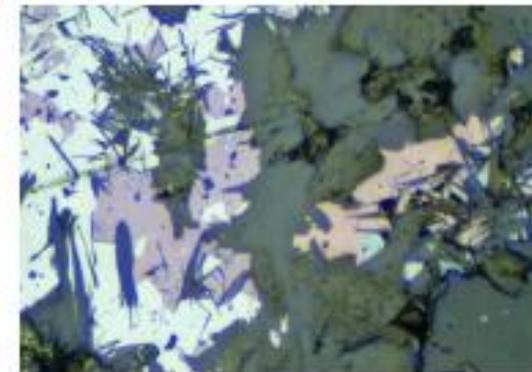


### BORNITA – Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>

ND: color rosa-marrón claro (similar a la pirrotina, pero más rosa), con pleocroísmo muy débil. Reflectividad del 25%, sin birreflectancia. Apagado en 30 minutos a un color violeta muy característico.

NC: muy oscuro, con anisotropía variable en colores oscuros y verdosos. Sin reflejos internos. Se asocia con calcocina (blanco).

*Imagen: ND, bornita borrosa (rosa-azul), bornita sin neblina (rosa claro-marrón), calcocita (blanco) y ganga (oscuro)*

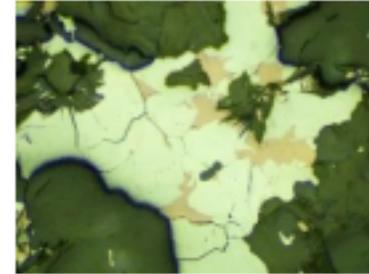


### **CALCOCITA – Cu<sub>2</sub>S**

ND: color azul-gris o azul-blanco, con pleocroísmo muy débil. Reflectividad del 30%, sin birreflectancia. Muchos surcos.

NC: Muy oscuro, con anisotropía muy débil, casi imperceptible. Sin reflexiones. ¡Parece un mineral isotrópico! Se asocia con otros minerales de Cu, como la bornita y los minerales secundarios (covelina).

*Imagen: ND, calcocita (blanca), bornita (rosa) y ganga (oscura).*

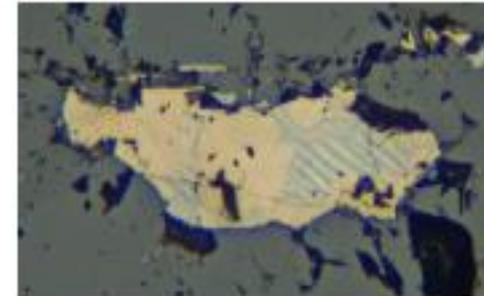


### **DIGENITA – Cu<sub>9</sub>S<sub>5</sub>**

ND: color azulado, sin pleocroísmo. 20% de reflectividad, sin birreflectancia ¡Muchos surcos azules! Humos rápidamente a marrón.

NC: isotrópico y sin reflejos internos. Maclas lamelares posibles. Se asocia con otros minerales de Cu y pirita.

*Imagen: ND, digenita (azul), bornita (rosa), ganga (gris oscuro).*



[Extraído de Guía de Minerales Opacos - Henrich](#)