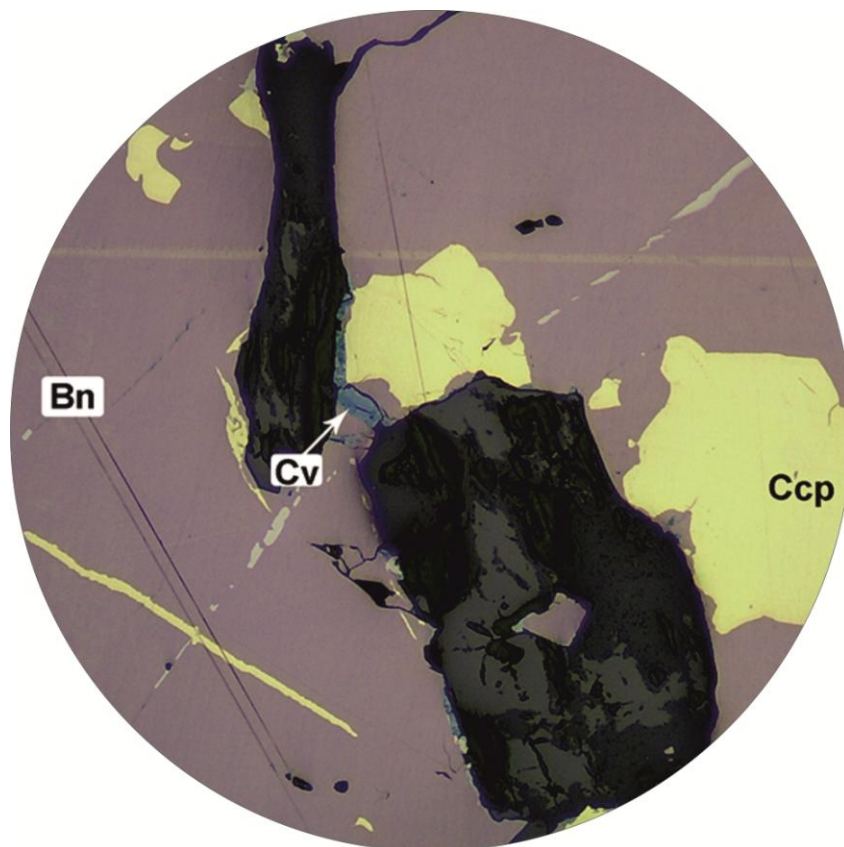


Microscopía práctica de minerales opacos

*Minerales y texturas más comunes –
Sulfuros, óxidos, y metales nativos en
diferentes tipos de yacimientos
minerales*

JOSÉ ÁNGEL LÓPEZ GARCÍA



Ediciones GEMM - Aula2pontonet



2019

Microscopía práctica de minerales opacos

Minerales y texturas más comunes – Sulfuros, óxidos, y metales nativos en diferentes tipos de yacimientos minerales

JOSÉ ÁNGEL LOPEZ GARCÍA*

✉ jangel@ucm.es

**DEPARTAMENTO DE MINERALOGÍA Y PETROLOGIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE, 28040 MADRID - SPAIN**

**: J.A.L.G. se jubiló como Profesor Titular de Universidad a finales de Febrero de 2019*

*Bajo Licencia Creative Commons
(2019)
Reconocimiento No Comercial (by-
nc):*

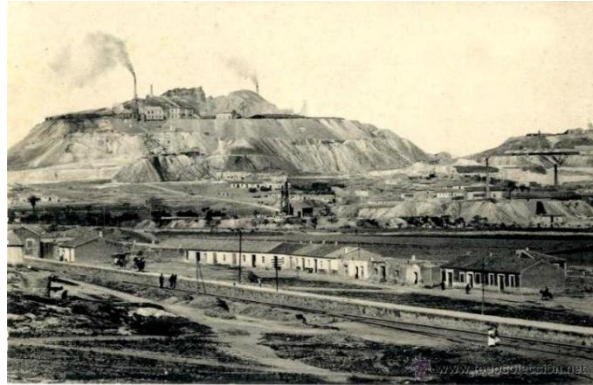
*Se permite la generación de obras derivadas
siempre que no se haga un uso comercial. En
cualquier explotación de la obra autorizada
por la licencia hará falta reconocer la autoría.*

Control de Edición & Internet: Roberto Oyarzun & Paloma Cubas
www.aulados.net/GEMM/GEMM.html

Imagen portada: Sulfuros (bornita: Bn; calcopirita: Ccp; y covellina: Cv) de Carlés (Asturias, España).

Sobre el autor

José Ángel López García completó sus estudios de geología en la Universidad Complutense (UCM, España) en 1977. Realizó su Tesis de Licenciatura en colaboración con la empresa "Sociedad Minera y Metalúrgica Peñarroya España", y desde 1977 hasta 1980 trabajó para el sector privado. En 1980 se unió a la UCM como Profesor Ayudante de Cristalografía y Mineralogía (Facultad de Ciencias Geológicas). En 1985 completó su doctorado con la tesis "Estudio mineralógico, textural y geoquímico de las zonas de oxidación de los yacimientos de Fe-Pb-Zn de la Sierra de Cartagena (Murcia)". Desde 1988 José Ángel López García ha sido Profesor Titular de Universidad. Desde entonces su labor docente ha incluido asignaturas de Cristalografía, Mineralogía, Yacimientos Minerales y Exploración Minera. También ha sido profesor visitante en la Universidad de Nancy (CREGU). Su investigación se ha centrado en el campo de las zonas de oxidación de yacimientos sulfurados, yacimientos de W-Sn relacionados con los granitos de las fases finales del Ciclo Tectónico Varisco, y de los procesos de mineralización (y alteración) epitermal de Au-Ag y Pb-Zn en el sureste de España.



*El Cabezo Rajao en los viejos tiempos. Distrito Minero de La Unión (Murcia. España)**

*: Sur "fabre minerals". Geoforum, <https://www.geoforum.fr/topic/33633-espagne-ses-min%C3%A9raux-et-gisements/>

INDICE

INTRODUCCIÓN 1

MINERALES QUE APARECEN EN ESTE MANUAL 3

Sulfuros de metales de base (1)	5
Sulfuros de metales de base (2)	8
Sulfuros de metales de base (3)	11
Sulfuros de metales de base (4)	14
Otros sulfuros (1)	17
Otros sulfuros (2)	20
Sulfuros de reemplazo y de enriquecimiento secundario	23
Sulfuros de enriquecimiento secundario	26
Metales nativos (Au, Ag y Cu) (1)	29
Metales nativos (Au, Ag y Cu) (2)	32
Fases minerales oxidadas	35
Oxidos y oxihidróxidos de Fe	38
Otras fases minerales oxidadas	41
Oxidos de cobre	44

YACIMIENTOS MINERALES QUE APARECEN EN ESTE MANUAL 47

Yacimientos magmáticos de cromo-platinoides. Bushveld (Sudáfrica)	49
Yacimientos de cromo en ofiolitas. Galicia (España), Mina del Águila (Grecia) y Bou Azzer (Marruecos)	52
Yacimientos de cromo y niquelina. Ojén y Carratraca (Málaga, España)	55
Yacimientos magmáticos de Ni-Cu. Pechenga (Rusia) y Aguablanca (Badajoz, España)	58
Yacimientos magmáticos de Fe-Ti. Bushveld (Sudáfrica) y Agracha (Marruecos)	61
Yacimientos tipo greisen (W-Sn). Panasqueira (Portugal) y Mina Teba (Badajoz, España)	64
Yacimientos tipo skarn de Au-Cu. Carlés (Asturias, España) (1)	67
Yacimientos tipo skarn de Au-Cu. Carlés (Asturias, España) (2)	70
Yacimientos de tipo pórfido Cu - (Mo). Chuquicamata y Andacollo (Chile)	73
Yacimientos epitermales de alta sulfuración. El Indio (Chile)	76
Yacimientos epitermales oxidados. Rodalquilar (Almería, España)	79
Yacimientos tipo VHMS. Neves Corvo (Portugal) (1)	82
Yacimientos tipo VHMS. Neves Corvo (Portugal) (2)	85
Yacimientos mesotermales de Au. Salsigne (Francia)	88
Yacimientos tipo Mississippi Valley. Reocín (Cantabria, España) (1)	91
Yacimientos tipo Mississippi Valley. Reocín (Cantabria, España) (2)	94
Yacimientos de oro en materiales sedimentarios del Precámbrico. Witwatersrand (Sudáfrica) (1)	97
Yacimientos de oro en materiales sedimentarios del Precámbrico. Witwatersrand (Sudáfrica) (2)	100

AGRADECIMIENTOS 103

BIBLIOGRAFIA 104



Sobre este manual

Este manual no pretende ser un estudio exhaustivo de los minerales opacos, para ello hay libros históricos como los de Ramdhor (1980), Picot y Zdeněk (1982) o Craig y Vaughan (1994), o los mas modernos de Taylor (2009) o Pracejus (2014). Tampoco se ha dedicado un capítulo a describir las propiedades ópticas de los minerales opacos en el microscopio, ya que hay numerosos manuales que lo explican de forma detallada, se supone que quien lea este documento ya ha obtenido dichos conocimientos. Un texto introductorio con las propiedades del microscopio de luz reflejada se puede encontrar *on-line* en la dirección: <http://www.microscopy.manchester.ac.uk/>.

Esta colección de fotografías, fruto de mas de 30 años de experiencia como profesor e investigador de Recursos Minerales en la Universidad Complutense de Madrid pretende ayudar a los estudiantes que comienzan sus estudios en el microscopio de luz reflejada a observar las propiedades y texturas de los minerales mas comunes, especialmente sulfuros, que se encuentran en las paragénesis de las mineralizaciones.

Las imágenes se muestran en varios apartados que agrupan cuatro fotografías (A a la D) y su descripción. Se comienza con los minerales mas comunes en la mayoría de las mineralizaciones estudiadas, con algunas excepciones, es decir se describen los sulfuros de los metales de base: pirita, calcopirita, esfalerita y galena, junto con otros sulfuros que suelen acompañar, como marcasita, arsenopirita, bornita, stibnita, molibdenita y los sulfuros secundarios de cobre, como covellina y calcosina, producto de transformación de sulfuros primarios. Se describen también elementos nativos y los principales óxidos.

A continuación, se han reunido imágenes de algunos de los yacimientos que se estudian en las asignaturas de Recursos Minerales del Departamento de

Mineralogía y Petrología de la Universidad Complutense de Madrid: Yacimientos de cromo; de Cr-Ni; magmáticos de Ni-Cu; magmáticos de Fe-Ti; greisen W-Sn; skarn, VHMS ([Volcanic Hosted Massive Sulfides](#)); epitermales; MVT (Mississippi Vallet Type); y del distrito de oro mayor del mundo: Witwatersrand.

Al tratar de alguno de los yacimientos específicos, es posible que se repita información sobre minerales descritos anteriormente, consideramos que esto ayudará a entender mejor los procesos de identificación, aunque se produzca alguna reiteración en las descripciones.

El objetivo de este documento es ayudar en la identificación e interpretación textural de las mineralizaciones principalmente de sulfuros. Los comentarios de las imágenes pretenden ayudar a encontrar las claves de la identificación de los distintos minerales y sus texturas.

A través de la presencia de las diferentes fases minerales, podemos obtener información de la evolución geoquímica del yacimiento y sus condiciones de formación, intentaremos dar alguna información sobre estas cuestiones a lo largo del manual.

Minerales opacos que serán tratados en este manual

- Sulfuros principales: Pirita, calcopirita, bornita, esfalerita, galena.
- Otros sulfuros de hierro: Marcasita, pirrotina.
- Secundarios: Calcosina, covellina.
- Otros sulfuros y sulfosales: Estannita, arsenopirita, molibdenita, stibnita, cinabrio, pentlandita, enargita.
- Óxidos e hidróxidos: Magnetita, ilmenita, hematites, goethita, cuprita, tenorita, cromita, casiterita, wolframita.
- Elementos nativos: Oro, cobre, plata.

En muchas de las mineralizaciones estudiadas, los sulfuros mas abundantes, son los de hierro, bien como el mineral mas común que suele ser la pirita, pero también del polimorfo de ésta (la marcasita), y la pirrotina. La arsenopirita es otro de los minerales de hierro presentes en bastantes paragénesis hidrotermales, especialmente en las formadas a temperaturas mas elevadas.

Otros minerales de hierro, especialmente los que constituyen menas de este elemento, también serán tratados: magnetita y hematites, así como goethita.

Los sulfuros de Pb y Zn, galena y esfalerita, son también bastante frecuentes, aunque sea como fases minoritarias en muchas de las mineralizaciones observadas.

Los sulfuros de cobre, constituyen una familia importante desde el punto de vista numérico y económico. Las mineralizaciones secundarias de Cu, enriquecen los yacimientos en este elemento y en ocasiones hacen viable su explotación. Además de los sulfuros, se tratarán los óxidos (cuprita y tenorita) y el cobre nativo.

Oro y plata se encuentran como elementos nativos en la naturaleza; aunque por su abundancia, no son frecuentes, si se pueden encontrar en algunas mineralizaciones.

Las fases minerales oxidadas son muy importantes en determinados yacimientos, como los de W-Sn donde wolframita y casiterita son muy abundantes, o los yacimientos de Fe en los que magnetita, hematites y/o goethita están siempre presentes.

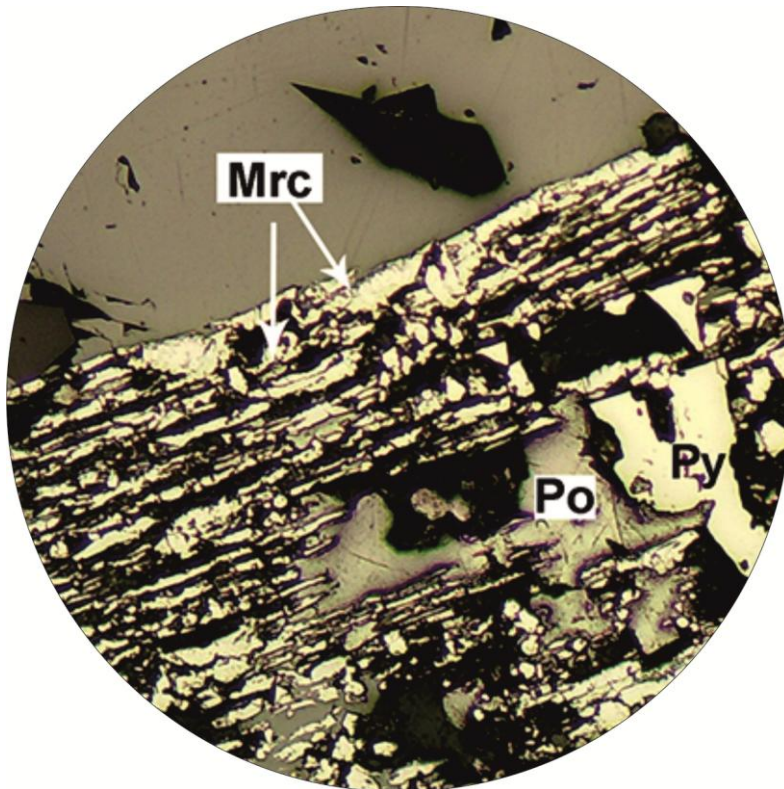
En los yacimientos de origen magmático, se encuentran fases minerales que no se dan en los yacimientos hidrotermales, como por ejemplo la cromita. Otro mineral característico de los yacimientos magmáticos de Ni-Cu es la pentlandita.

La niquelina, arseniuro de níquel (NiAs), es otro mineral del que se tratará mas adelante. Se han intentado agrupar los minerales por las paragénesis mas afines en cada uno de los casos.

Sobre la microscopía de minerales opacos

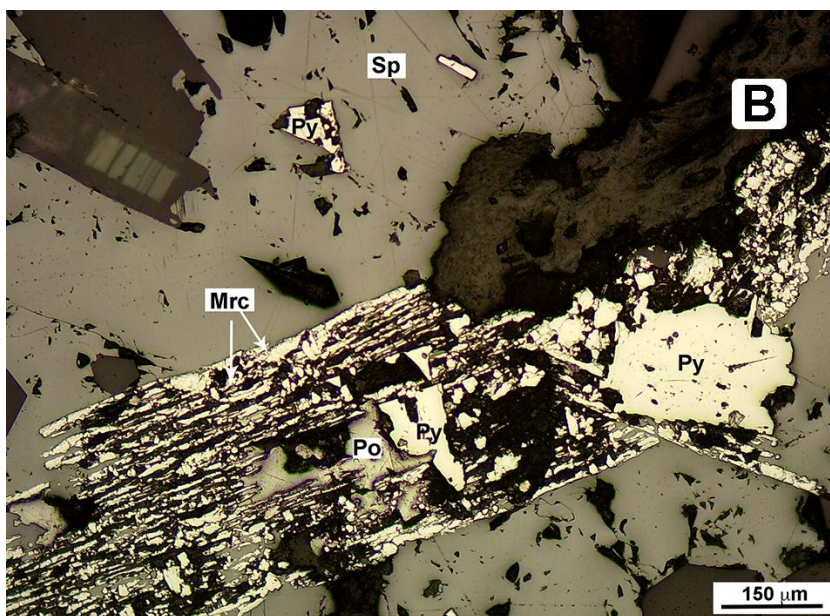
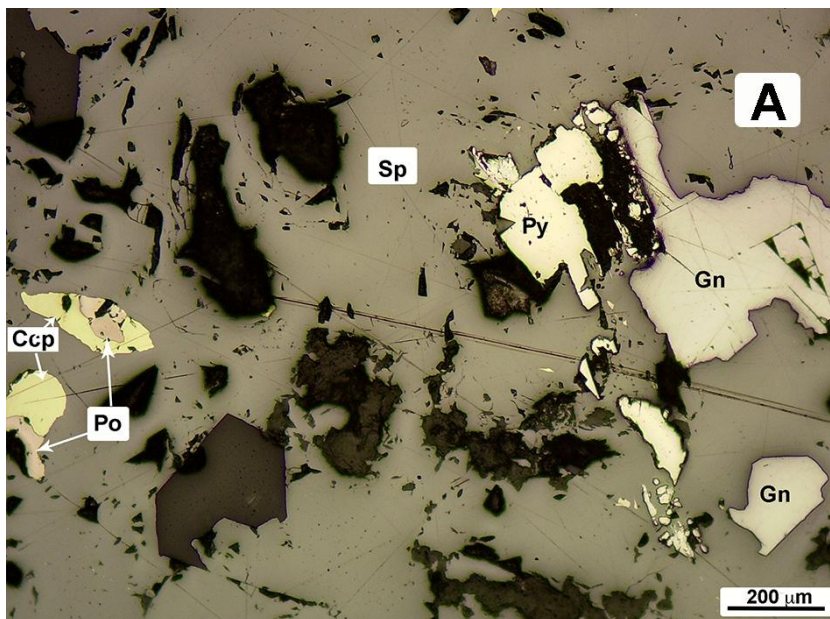
“El estudio de minerales opacos o sólidos sintéticos en una sección pulida utilizando el microscopio de luz reflejada de polarización es la técnica más importante para la identificación y caracterización de las fases opacas en una muestra y de las relaciones texturales entre ellas. Dado que la mayoría de los minerales metalíferos están compuestos de minerales opacos, este estudio se ha conocido tradicionalmente como microscopía de minerales opacos y ha encontrado sus mayores aplicaciones en el estudio de los yacimientos minerales.”

Craig y Vaughan (1982)



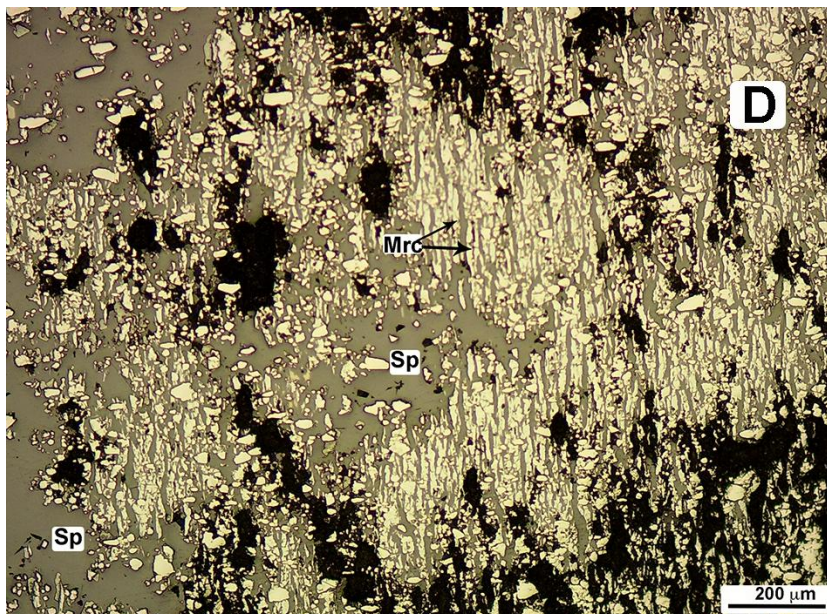
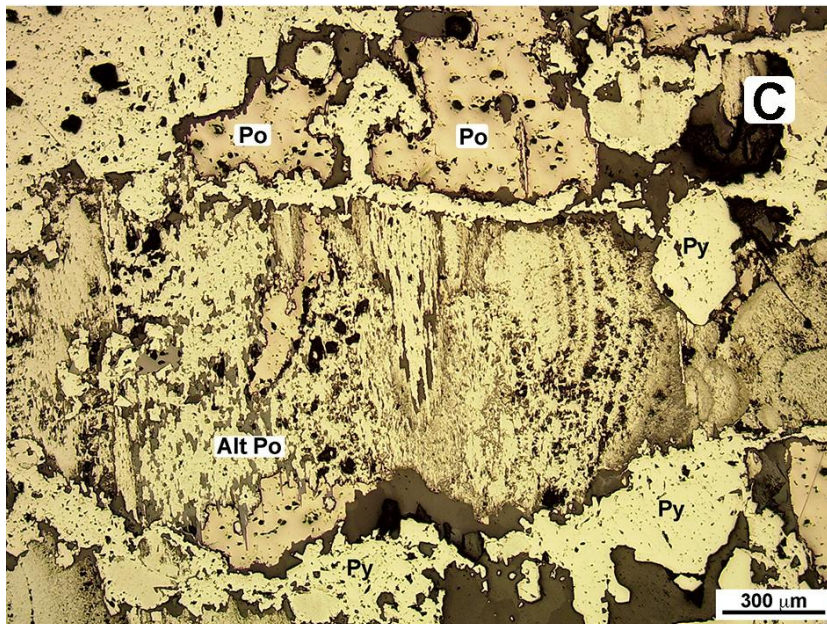
Sulfuros de metales de base (1)





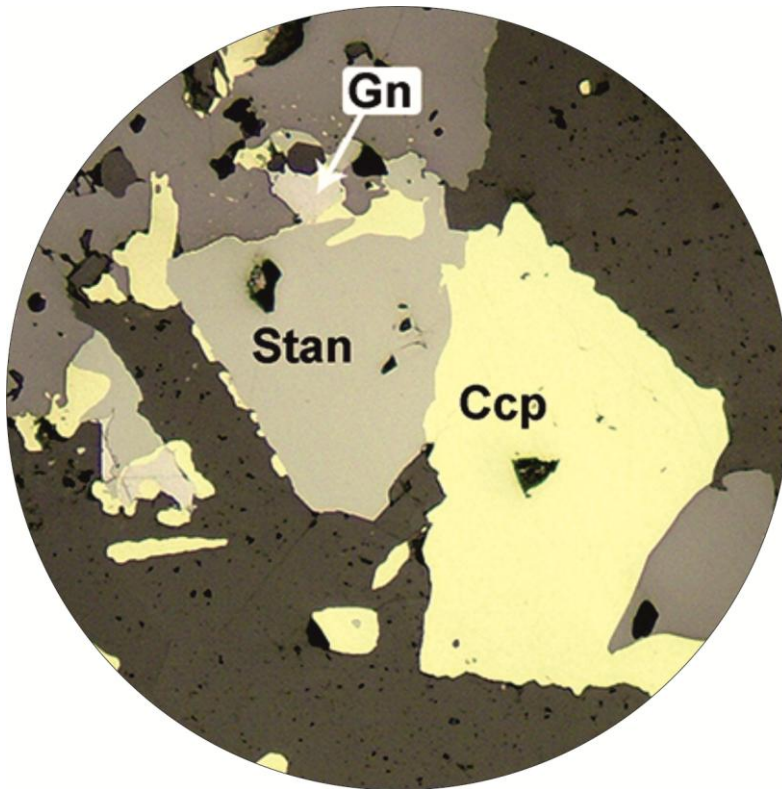
A: La esfalerita (Sp), ocupa la mayoría de la imagen. La pirita (Py) se distingue por su reflectividad alta y la tendencia a formar cristales idiomorfos. La calcopirita (Ccp), de color amarillo mas intenso y menos brillante que la pirita, esta acompañada de pirrotina (Po), de color beige a pardo y una reflectividad menor que la calcopirita. También hay un grano de galena (Gn) en la que se pueden observar las formas triangulares de color negro (*triangular pits*) que se originan en el pulido de la muestra y que son una de las propiedades que ayudan a identificarla.

B: Esfalerita masiva (Sp), acompañada por pirita (Py), pirrotina (Po) y marcasita (Mrc). Se puede observar que la pirrotina se ha transformado parcialmente a marcasita, proceso de alteración que se produce al cambiar las condiciones físico-químicas en la evolución de la mineralización.



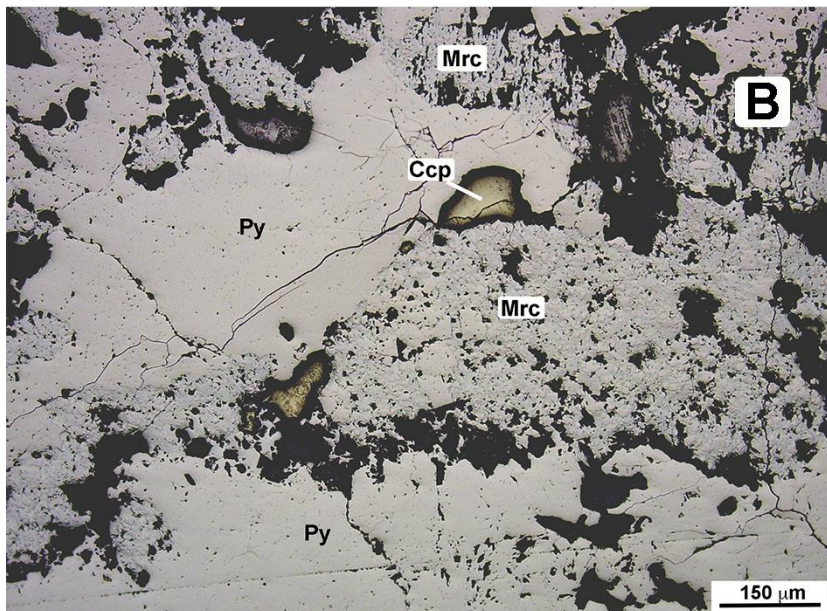
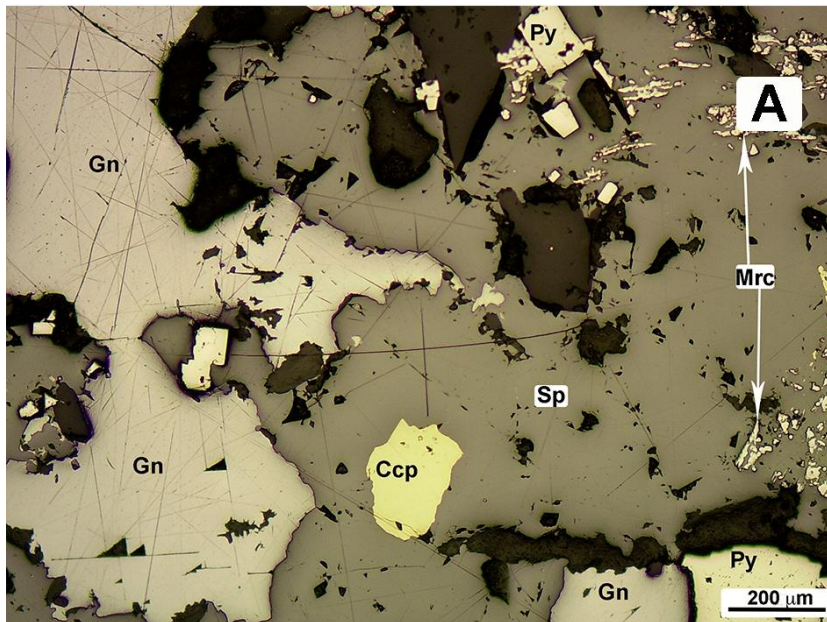
C: Pirita (Py) y pirrotina (Po). La pirrotina se está alterando (Alt Po) a sulfuros de hierro mas estables, como marcasita; en este proceso se puede formar melnikovita, un sulfuro de hierro amorfo como paso intermedio. Las texturas que se originan en este proceso se conocen como texturas "ojos de pájaro".

D: Intercrecimientos de esfalerita (Sp) y marcasita (Mrc). Estos intercrecimientos con tamaños de grano tan pequeños, son un inconveniente en los procesos metalúrgicos, ya que dificultan la liberación de esfalerita. La diferenciación de pirita y marcasita se hace en función de la anisotropía (marcasita) o isotropía (pirita) de los minerales.



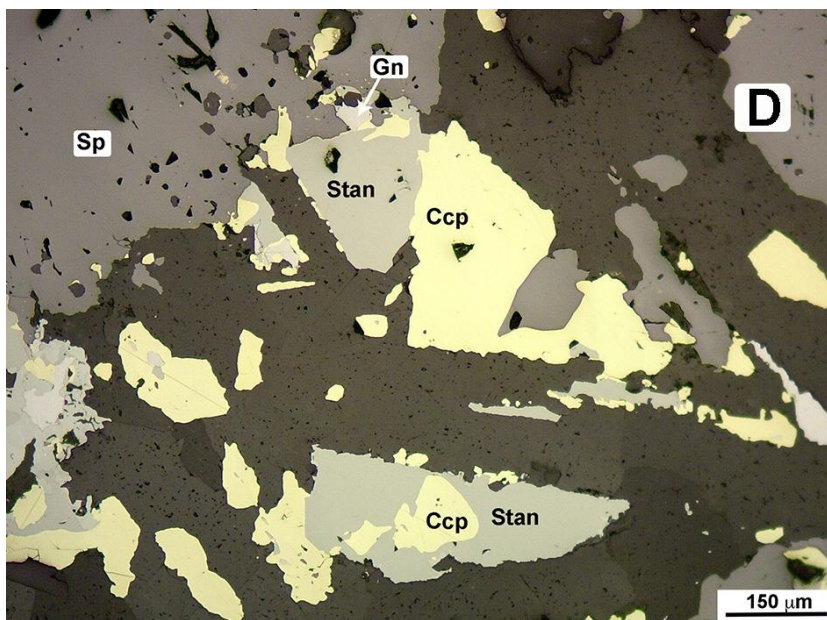
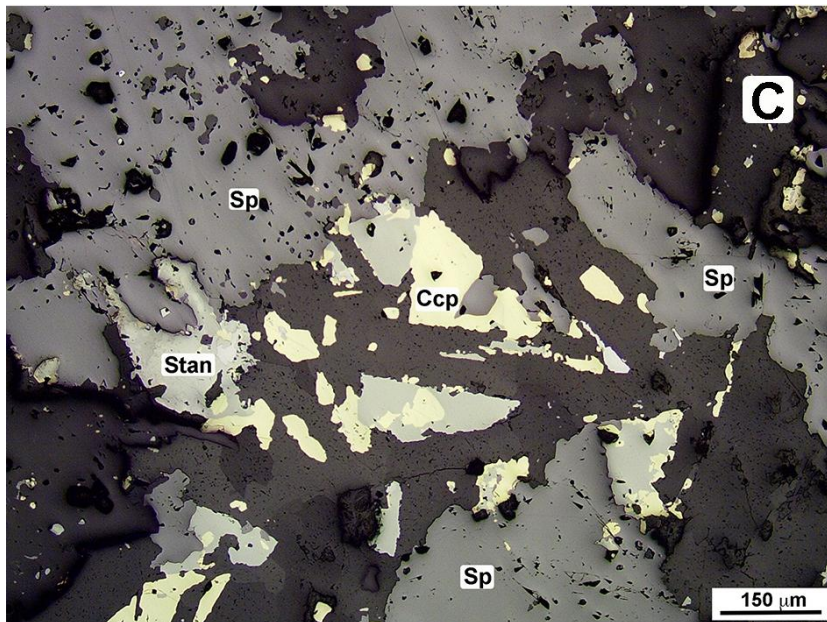
Sulfuros de metales de base (2)





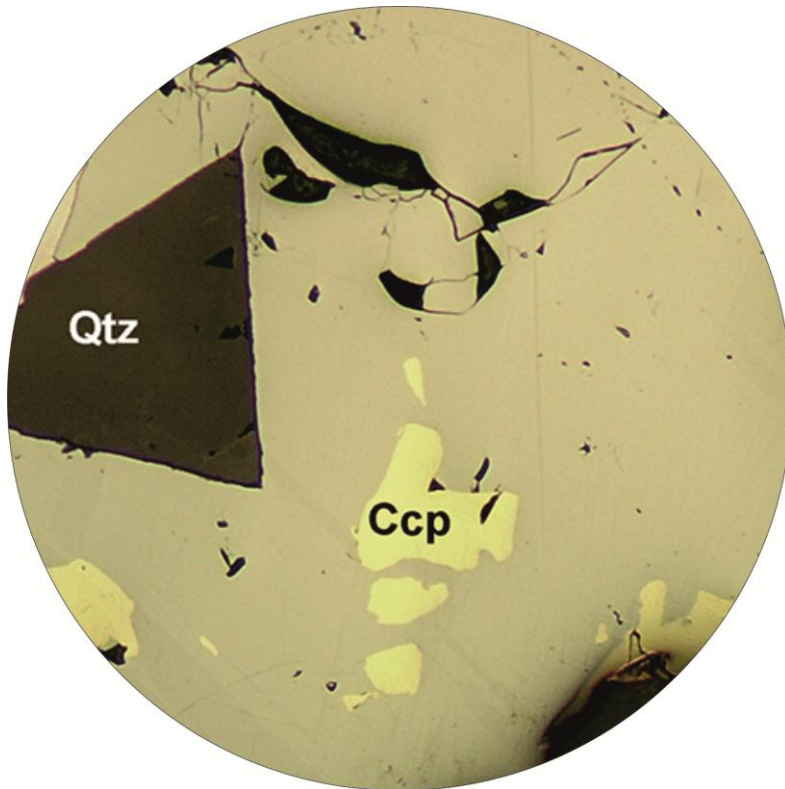
A: La presencia conjunta de pirita (Py), calcopirita (Ccp), esfalerita (Sp), galena (Gn) y marcasita (Mrc) permite diferenciar mejor sus propiedades ópticas.

B: Pirita (Py) y marcasita (Mrc), con calcopirita (Ccp) accesoria. Se puede observar el tono mas pálido de la marcasita y una textura mas oquerosa que la pirita. La anisotropía con tonos verdosos de la marcasita es otra propiedad para diferenciarla de pirita.



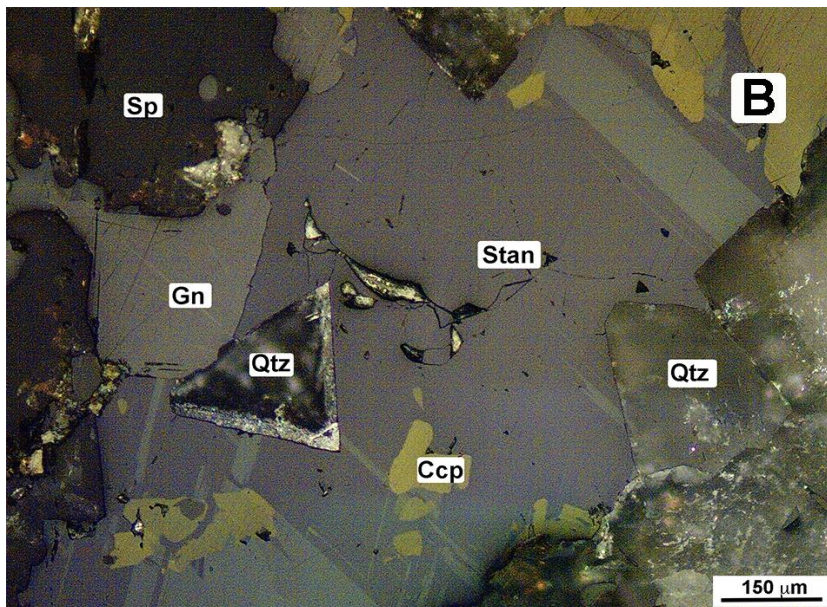
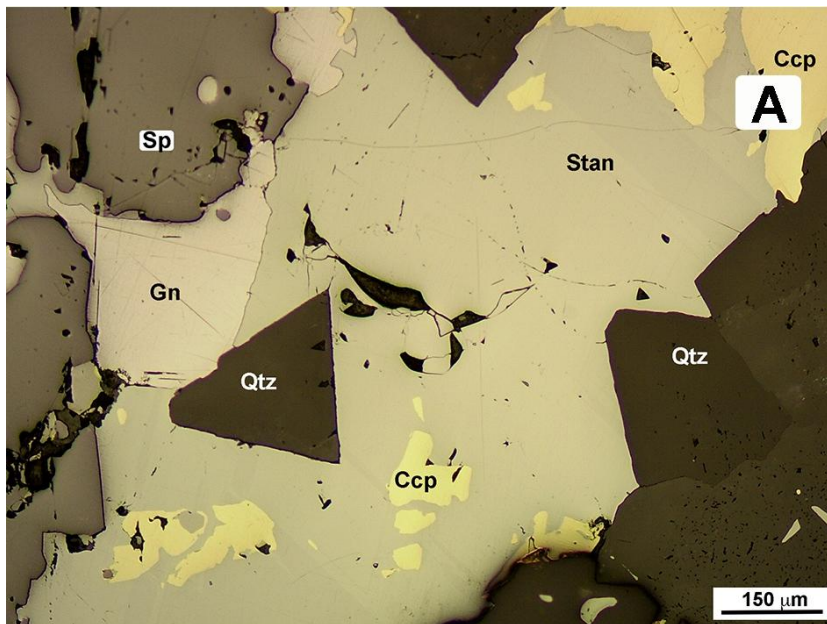
C: Esfalerita (Sp) y calcopirita (Ccp), acompañadas de minerales transparentes (color oscuro) y estannita: $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ (Stan). La estannita, frecuente en mineralizaciones de cobre, tiene color gris con tonos verdosos, es anisótropa y menos reflectiva que la galena.

D: Detalle de la imagen anterior, se puede observar un pequeño cristal de galena (Gn) junto a la estannita (Stan).



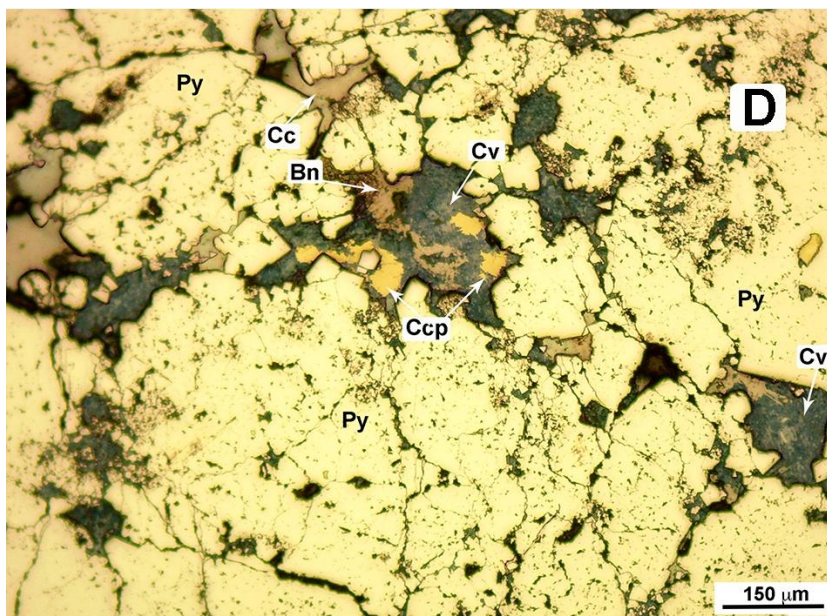
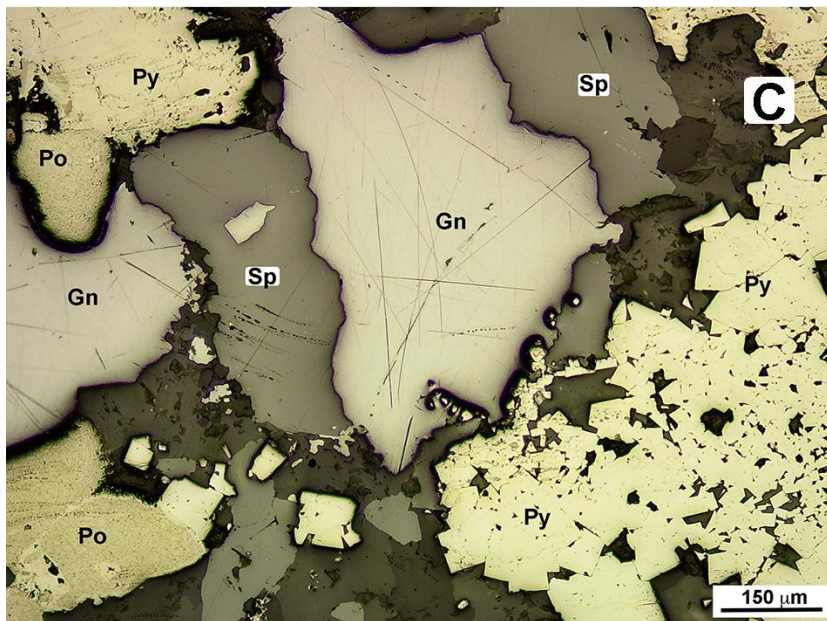
Sulfuros de metales de base (3)





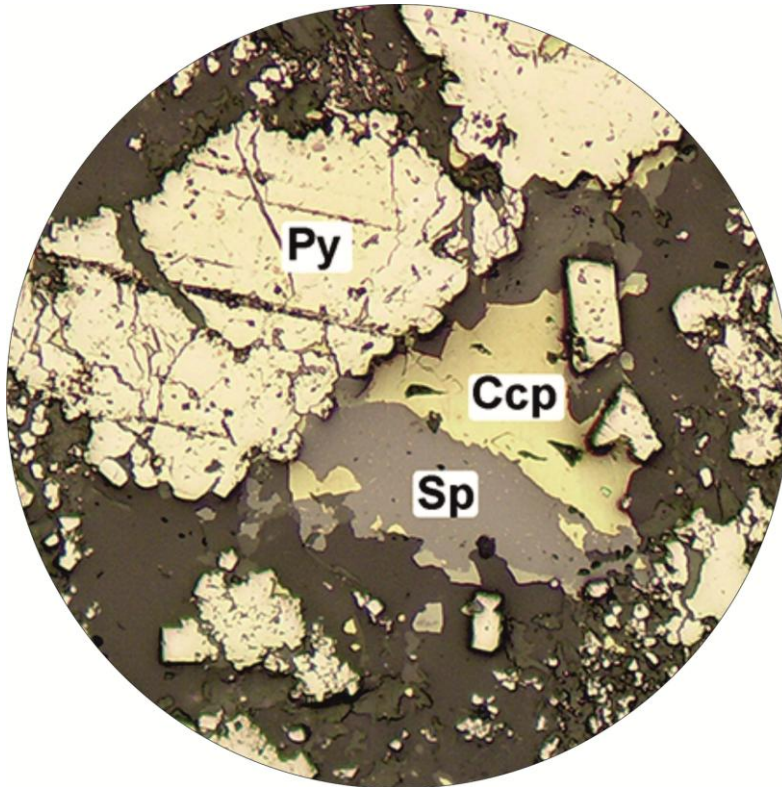
A: Imagen con estannita (Stan) con inclusiones de calcopirita (Ccp), acompañado de esfalerita (Sp) y galena (Gn) en la que se pueden apreciar las diferencias de sus propiedades ópticas (reflectividad). La ganga es cuarzo (Qtz) del que se pueden observar los cristales prismáticos a la derecha de la imagen.

B: Imagen anterior, con los nícoles parcialmente cruzados. Se puede observar la anisotropía y la presencia de maclas en la estannita (Stan).



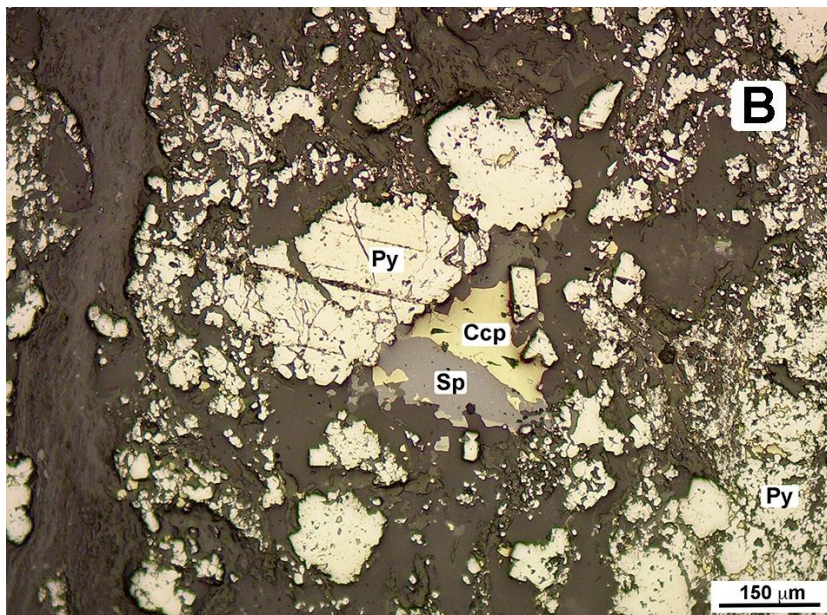
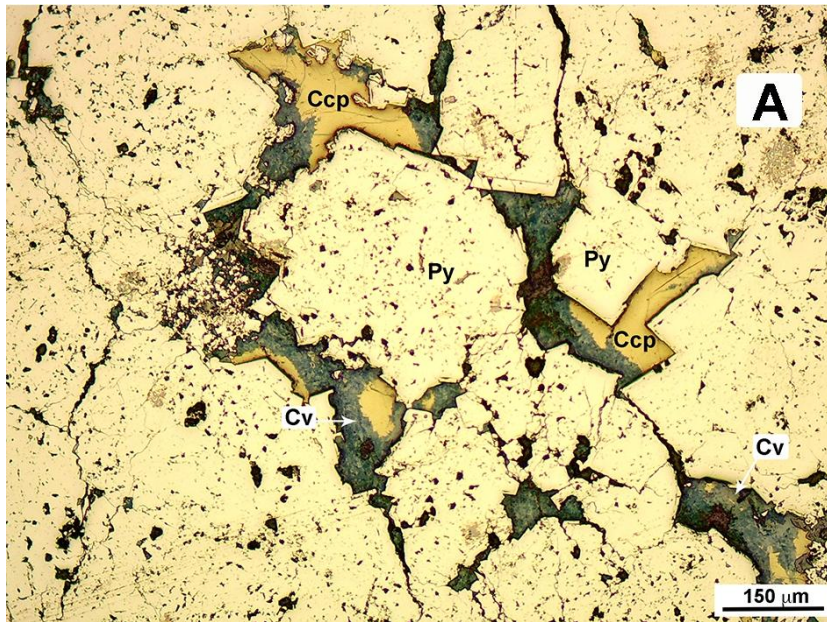
C: Muestra de pirita (Py), esfalerita (Sp), galena (Gn) y pirrotina (Po). Se pueden ver secciones cuadradas, que indican el sistema cúbico de la pirita.

D: Muestra procedente de una mineralización de sulfuros masivos. La pirita (Py) es el mineral mas abundante y sería el primero en formarse. Calcopirita (Ccp) rellena huecos y fisuras. Un proceso posterior dió lugar a la alteración de calcopirita y formación de bornita (Bn), calcosina (Cc) y covellina (Cv).



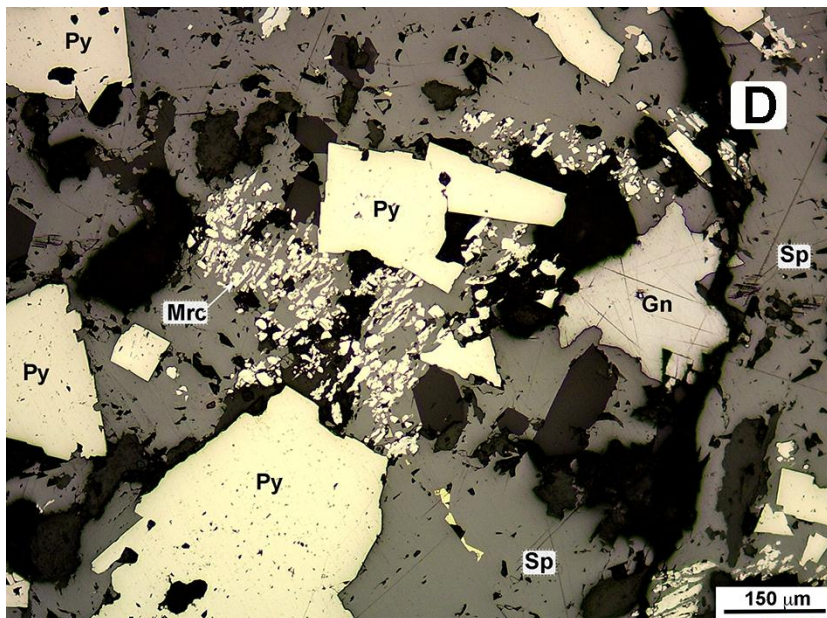
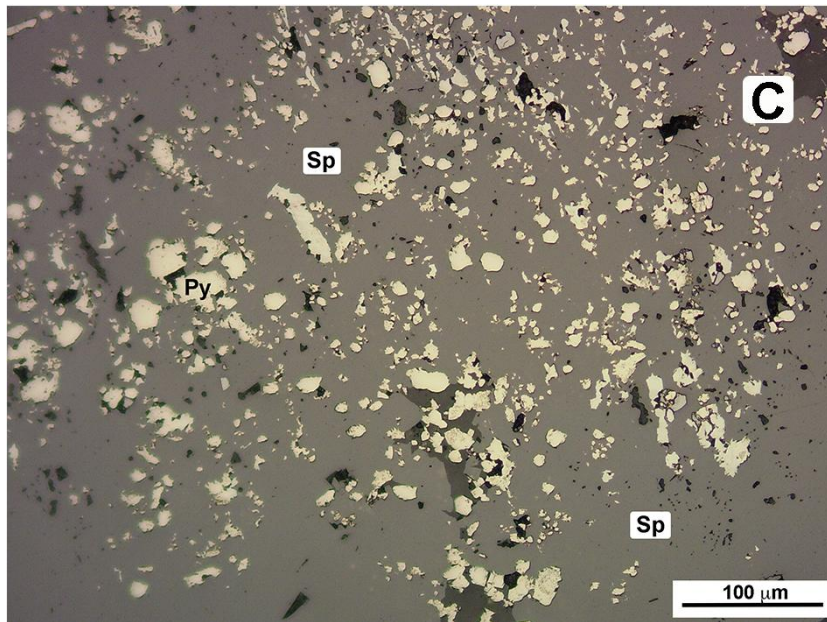
Sulfuros de metales de base (4)





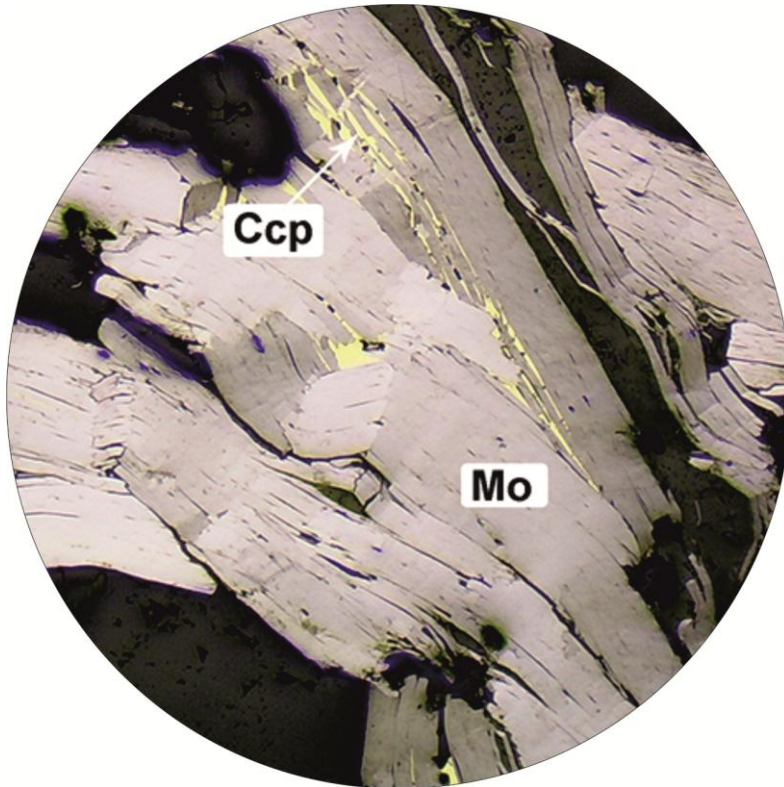
A: Imagen en la que la pirita (Py) ocupa la mayor parte de la muestra, la calcopirita (Ccp) situada en fisuras y huecos de pirita se está alterando a covellina (Cv). Cuando están juntas calcopirita y pirita, el proceso de alteración es mayor en la calcopirita que en la pirita.

B: En la imagen se puede observar pirita (Py) formada en primer lugar, fracturada e intercrecida con la ganga, y esfalerita (Sp) y calcopirita (Ccp), formadas mas tardíamente.



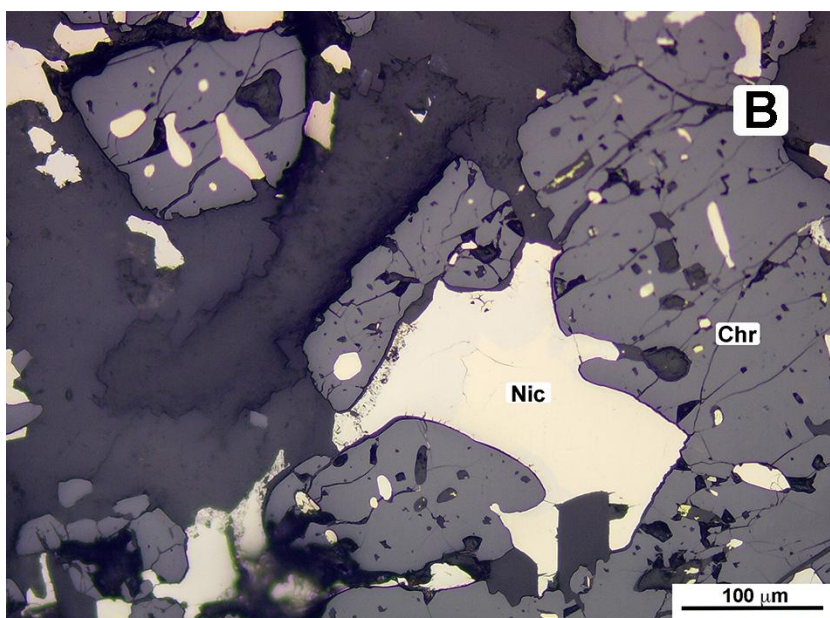
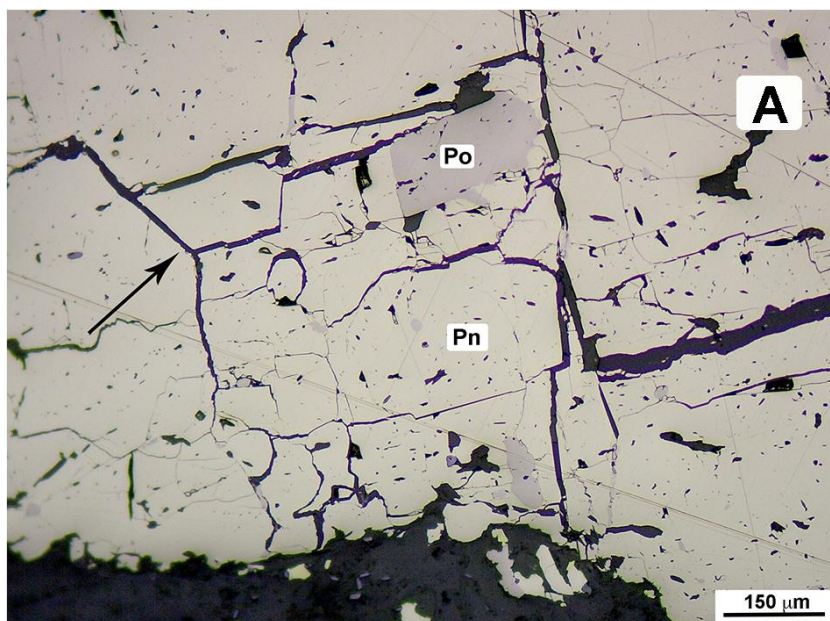
C: Esfalerita (Sp) masiva, con pequeños cristales de pirita (Py). Texturalmente la muestra es interesante porque muestra las dificultades de separación mineral en el proceso metalúrgico, debido al tamaño de los granos de la pirita.

D: Otra muestra con pirita (Py), esfalerita (Sp), galena (Gn) y marcasita (Mrc). Se pueden observar las diferencias texturales de la marcasita y la tendencia al idiomorfismo de la pirita.



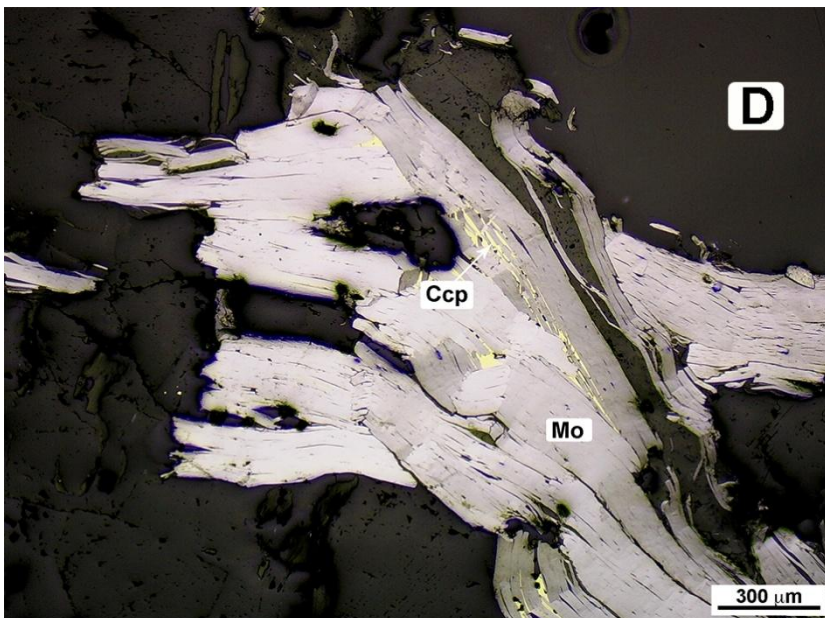
Otros sulfuros (1)





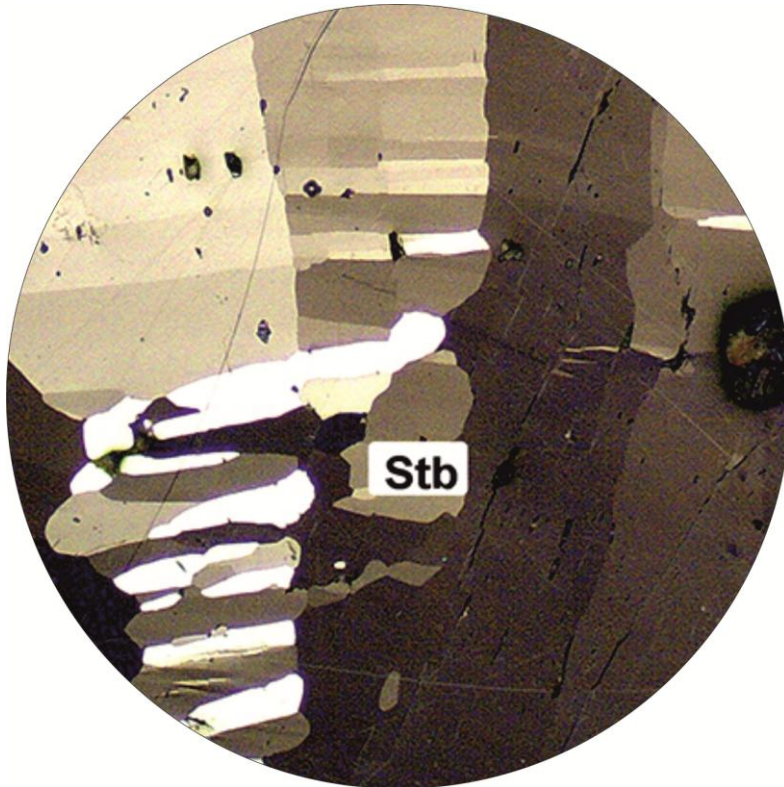
A: Pentlandita (Pn) de color blanco amarillento con pirrotina (Po) de tonos marrones. La pentlandita tiene propiedades similares a la pirita, se la diferencia por su menor dureza, por la fracturación pseudo-exfoliación en direcciones a 120° (ver flecha). Además, la pentlandita es un mineral que se forma en yacimientos de origen magmático de Ni-Cu, mientras la pirita es un mineral más ubicuo.

B: La niquelina (Nic) es un arseniuro de níquel, se reconoce por su color rosado, alta reflectividad, birreflexión y fuerte anisotropía de colores verdesos. Se asocia a mineralizaciones magmáticas de Ni. En la imagen se encuentra con cromita (Chr), mineral formado en yacimientos magmáticos de Cr; la cromita es isótropa, dura y de reflectividad baja. En la imagen se observa que la niquelina precipita en los huecos dejados por los cristales de cromita.



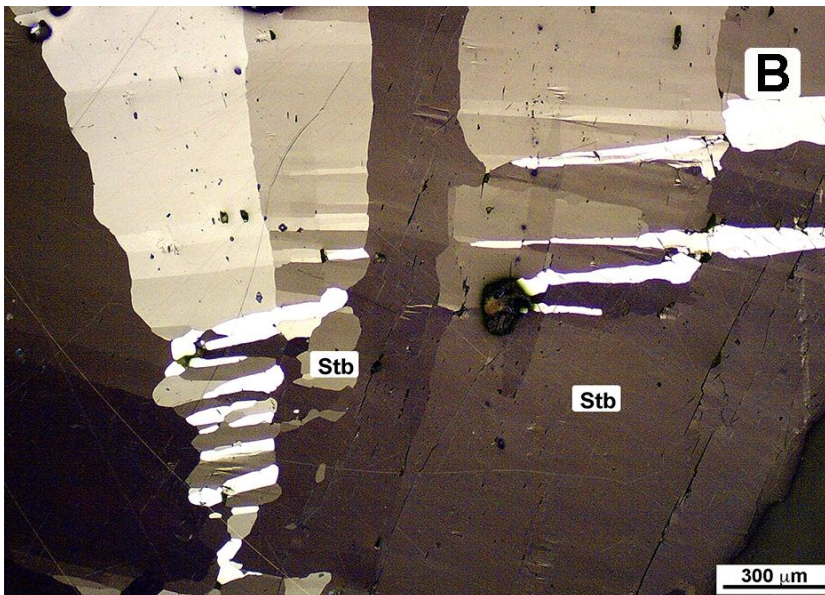
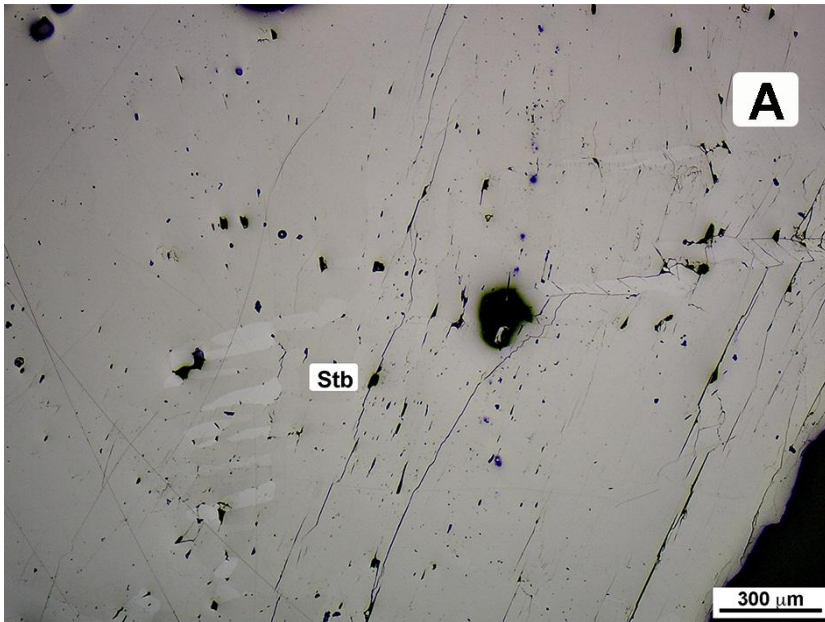
C: La arsenopirita (Apy) es un sulfuro bastante frecuente en mineralizaciones hidrotermales de alta temperatura; es frecuente la presencia de cristales idiomorfos, con morfología rómbicas, que ayudan a diferenciarlo de pirita, de la que también se distingue por el tono mas blanco y la anisotropía de tonos azules y violetas. De la marcasita se diferencia por los colores de anisotropía (verdes) y por su paragénesis (la marcasita suele ser un mineral formado a temperatura mas baja).

D: Molibdenita (Mo) es el sulfuro de molibdeno mas común. Puede encontrarse en yacimientos de W-Sn y también en los de tipo pórfido. Sus propiedades: birreflexión intensa, anisotropía muy fuerte, exfoliación visible, deformación de los cristales con el pulido, la hacen prácticamente inconfundible.



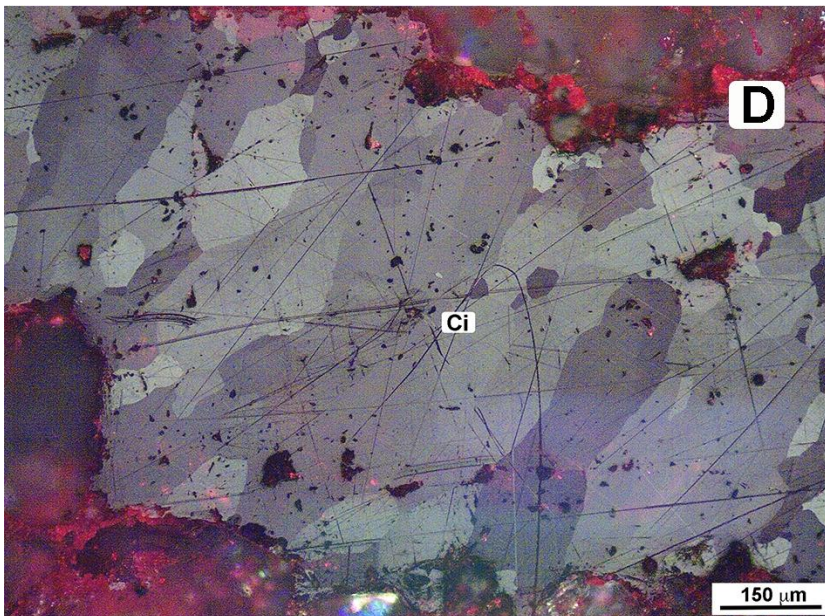
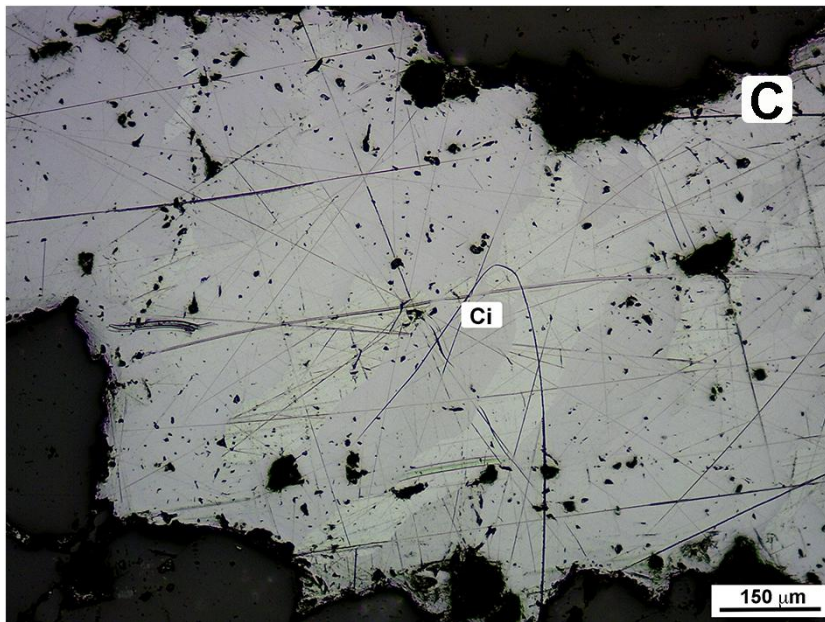
Otros sulfuros (2)





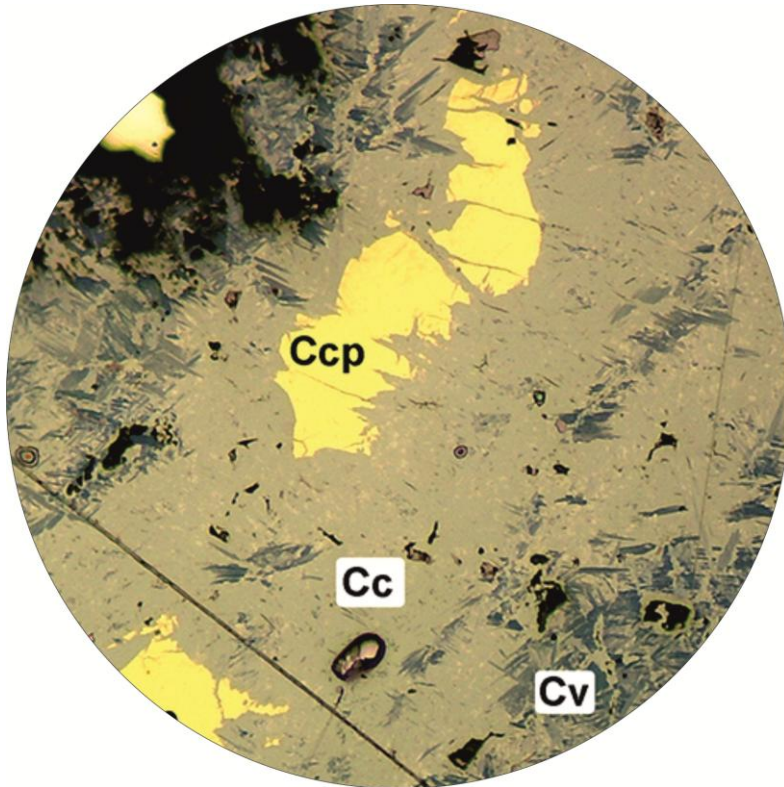
A: La stibnita (Stb) es otro de los sulfuros de fácil diferenciación por su birreflexión y anisotropía con tonos marrones, y en la que se reconocen frecuentemente maclas laminares.

B: Imagen anterior con dos polarizadores. Se pueden observar las maclas laminares y los colores de anisotropía de la stibnita.



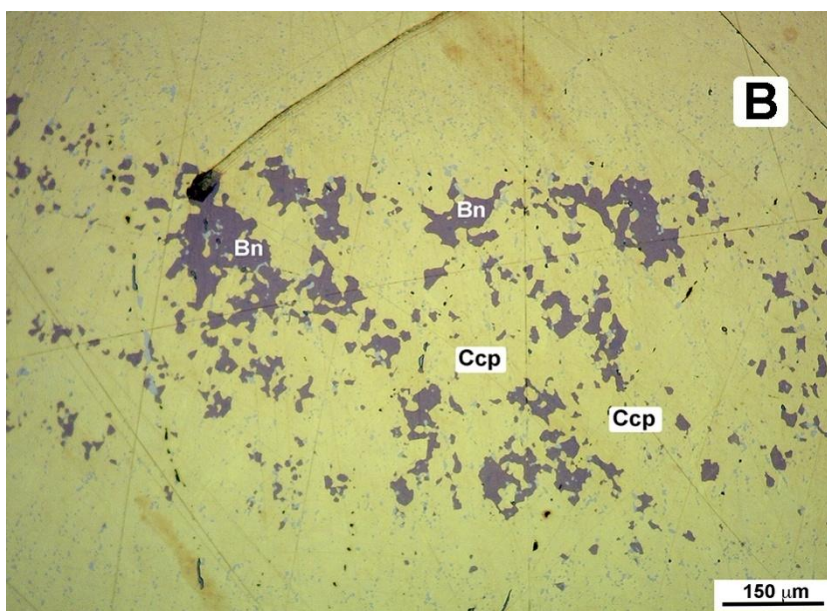
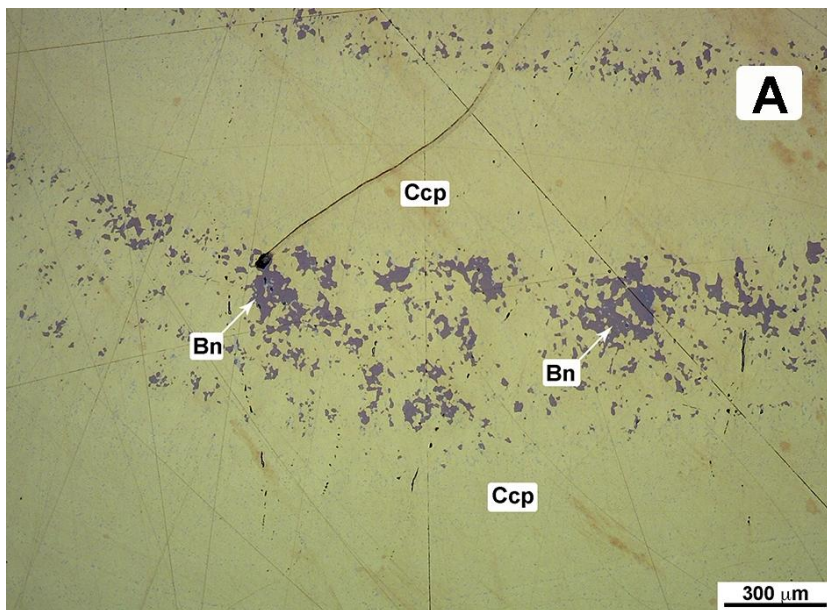
C: El cinabrio (Ci) es otro de los sulfuros de fácil identificación, presenta también birreflexión, y anisotropía fuerte. Es de los pocos minerales que con reflectividad media tiene reflexiones internas (de color rojo) muy fuertes.

D: Imagen anterior con dos polarizadores. Se puede observar la fuerte anisotropía y las reflexiones internas del cinabrio.



Sulfuros de reemplazo y de enriquecimiento secundario

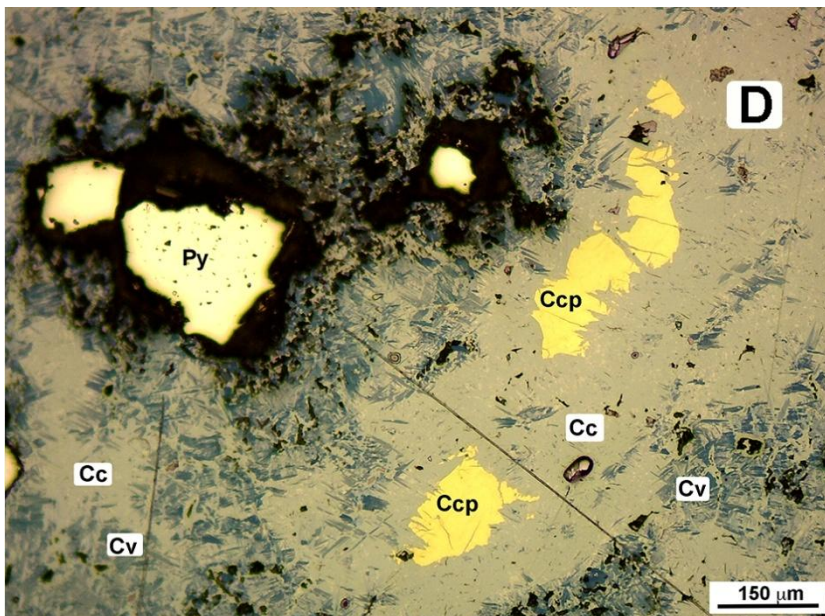
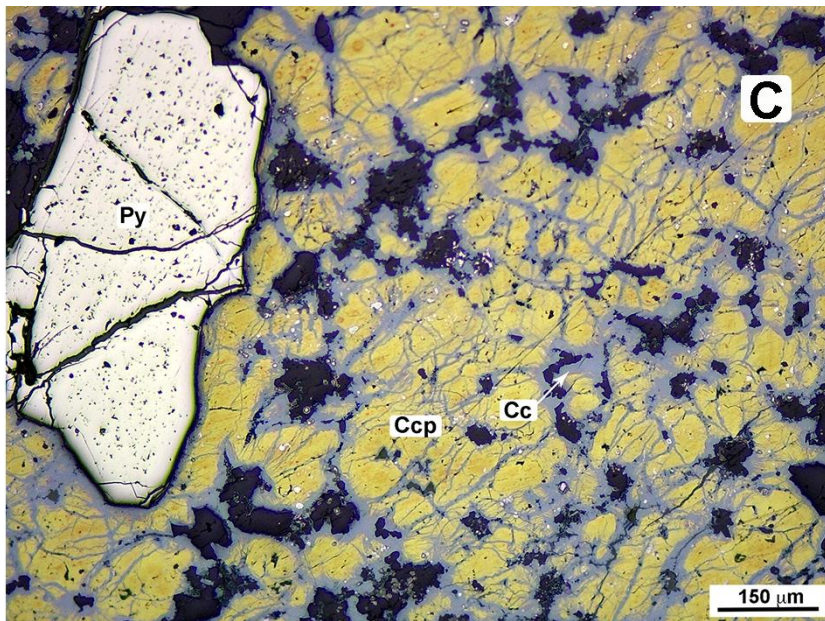




En los procesos hidrotermales y de enriquecimiento supergénico, los elementos menos afines con el azufre son sustituidos por aquellos más afines, especialmente el cobre. Es por lo cual los minerales más tardíos son más ricos en cobre que las mineralizaciones tempranas de sulfuros.

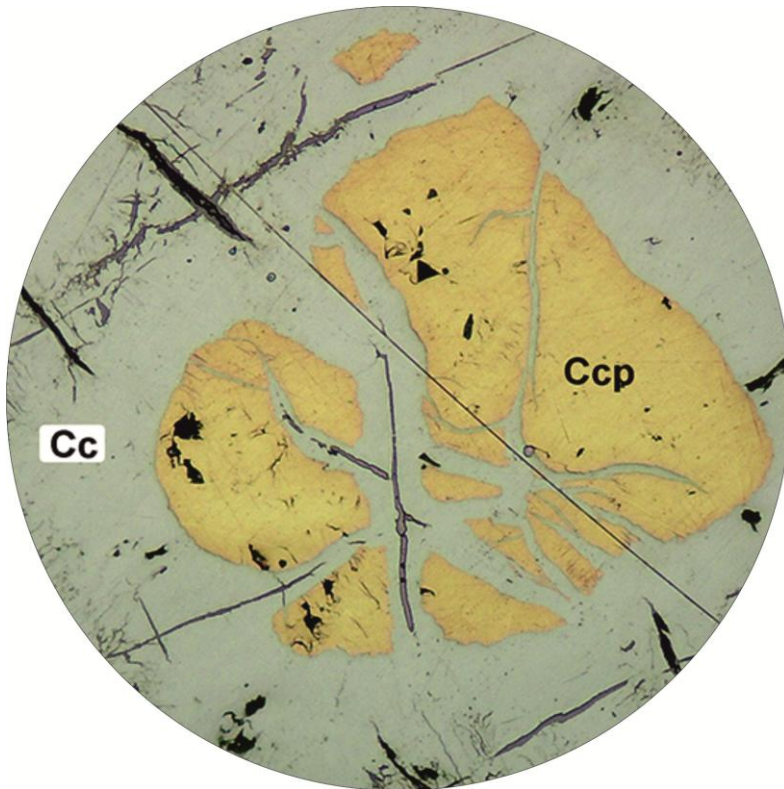
A: La mineralogía de sulfuros de cobre y hierro es variada, el mineral más común es la calcopirita (Ccp). En función de la abundancia relativa de esos elementos, se pueden formar otros minerales como por ejemplo bornita (Bn).

B: Detalle de la imagen A, con los intercrecimientos entre calcopirita (Ccp) y bornita (Bn).



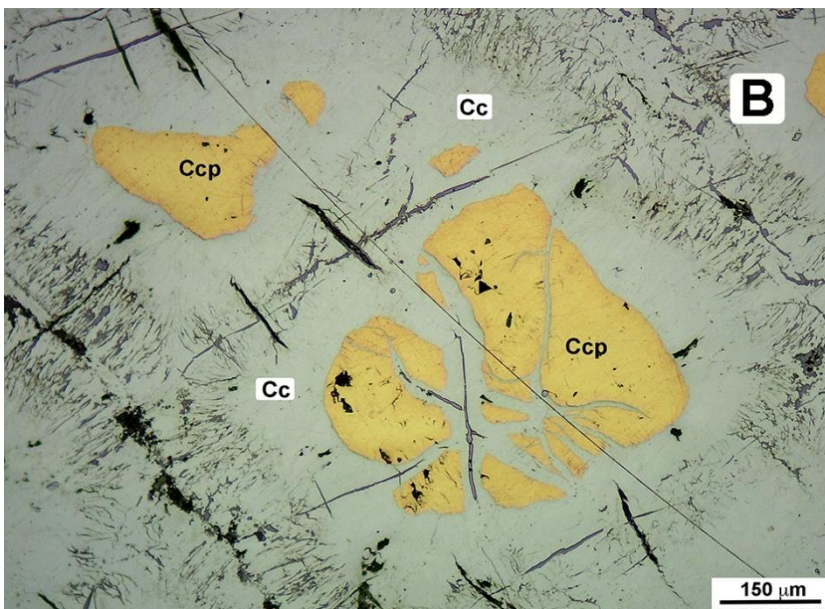
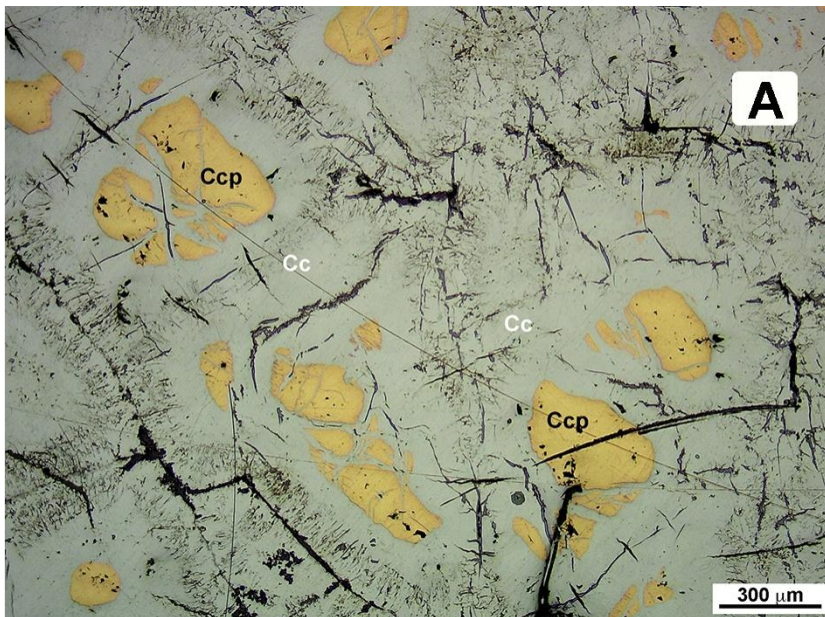
C: Cuando coexisten pirita (Py) y calcopirita (Ccp) los procesos de alteración se desarrollan antes en la calcopirita que en la pirita. En la imagen, se puede observar una pirita sin alterar, mientras la calcopirita se está transformando a calcosina (Cc) por bordes de grano y fracturas.

D: Ejemplo similar al anterior, la mayor parte de calcopirita (Ccp) se ha transformado a calcosina (Cc) y covellina (Cv). La pirita (Py) está parcialmente alterada (rodeada por huecos), pero el cristal se mantiene estable.



Sulfuros de enriquecimiento secundario

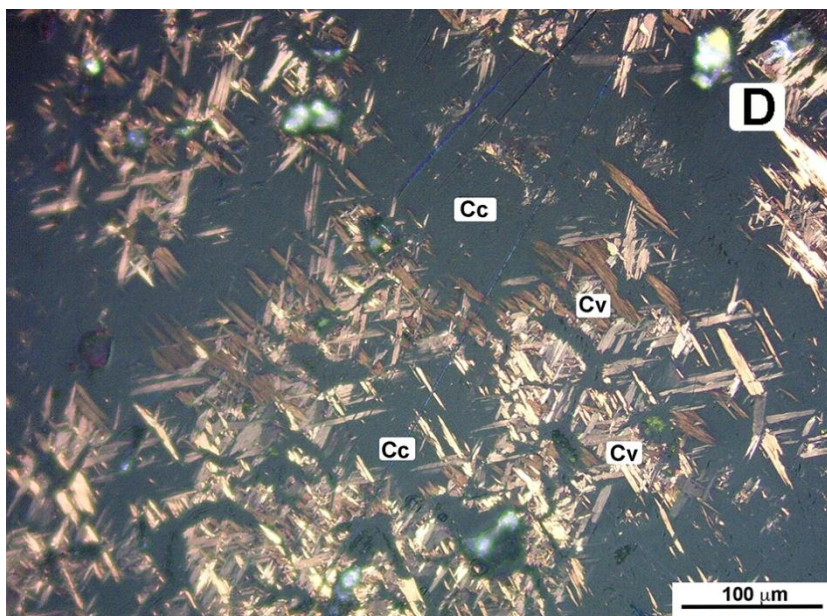
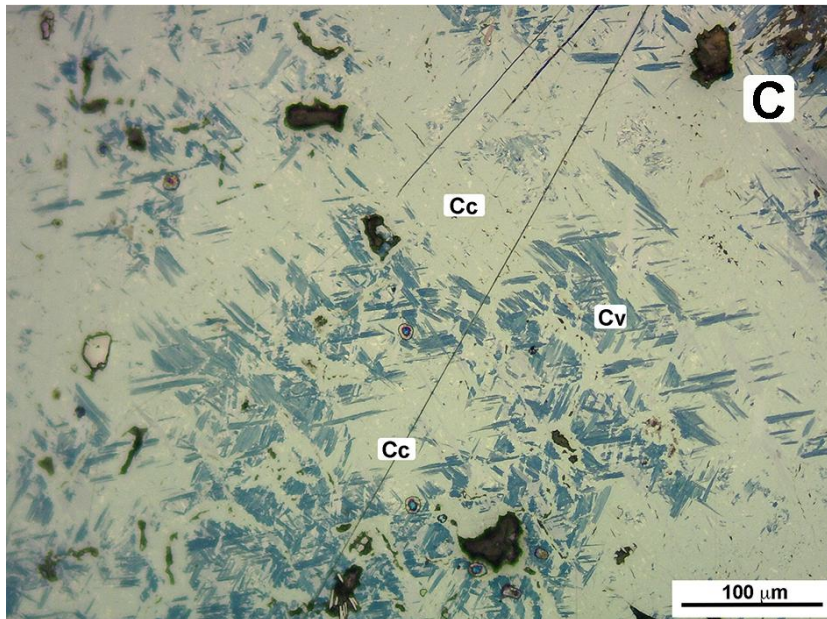




Es precisamente el proceso físico-químico de enriquecimiento secundario el que hace que muchas mineralizaciones de cobre puedan ser explotadas económicamente, ya que las leyes de las zonas con minerales primarios de cobre, como la calcopirita, son en general bajas.

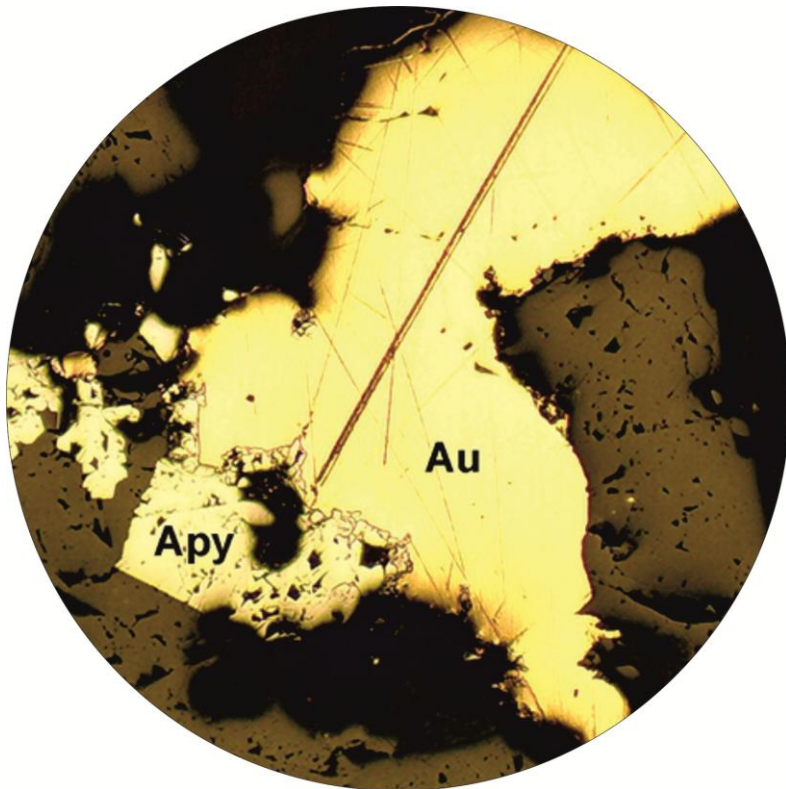
A: En esta imagen, calcosina (Cc) ha reemplazado en casi todo el campo a la calcopirita (Ccp). En los bordes se puede observar como el proceso de alteración supergénica continúa y la calcosina se está alterando a otros minerales oxidados de Cu.

B: Detalle de la imagen anterior, en la que se observa más claramente la alteración de calcosina.



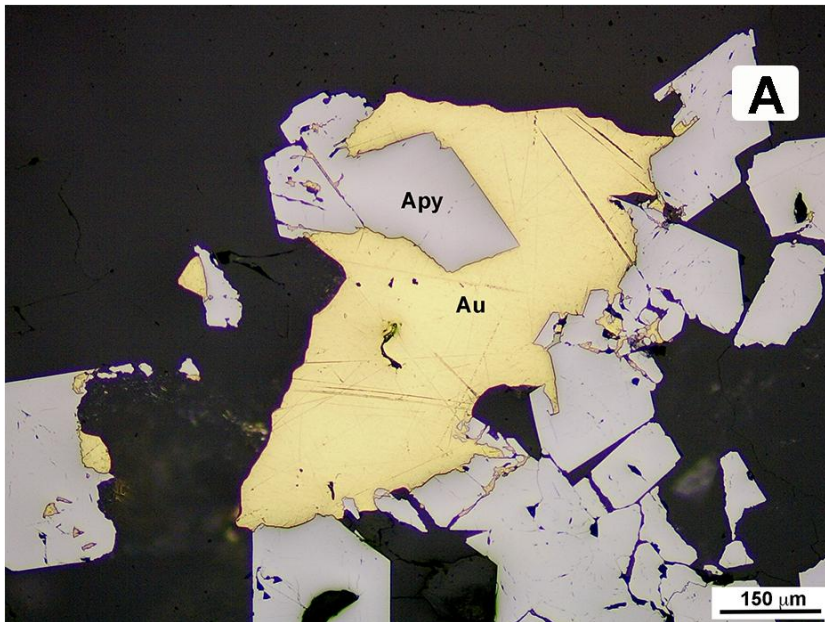
C: Calcosina (Cc) y covellina (Cv) se encuentran juntas en numerosas mineralizaciones. Debido a la birreflexión de la covellina (de azul grisáceo a azul intenso), en determinadas posiciones es difícil diferenciar una de otra. En la imagen, parece que la mayoría del mineral es calcosina.

D: Imagen anterior con dos polarizadores. Se puede observar que la mayor parte del campo está ocupada por la covellina (Cv) reconocible por su anisotropía, mientras que las zonas más oscuras corresponden a la presencia de calcosina (Cc).

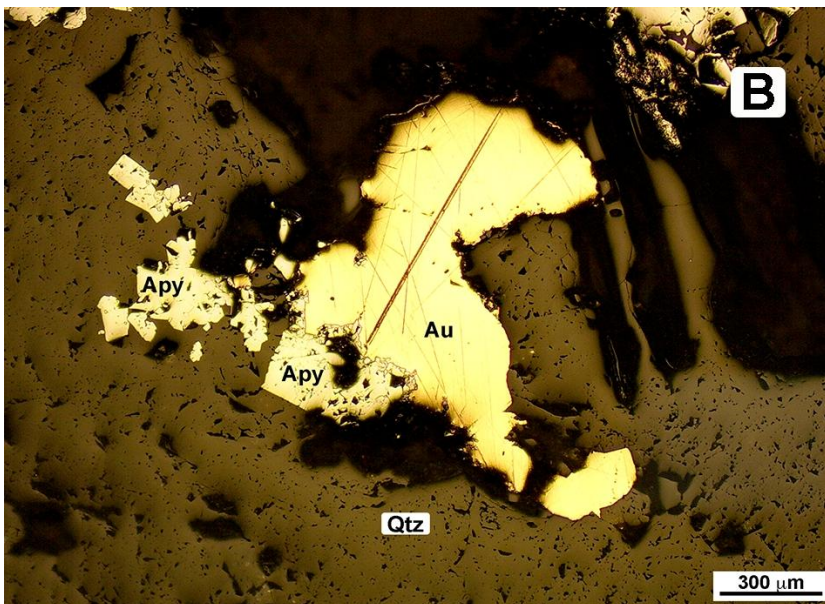


Metales nativos (Au, Ag y Cu) (1)



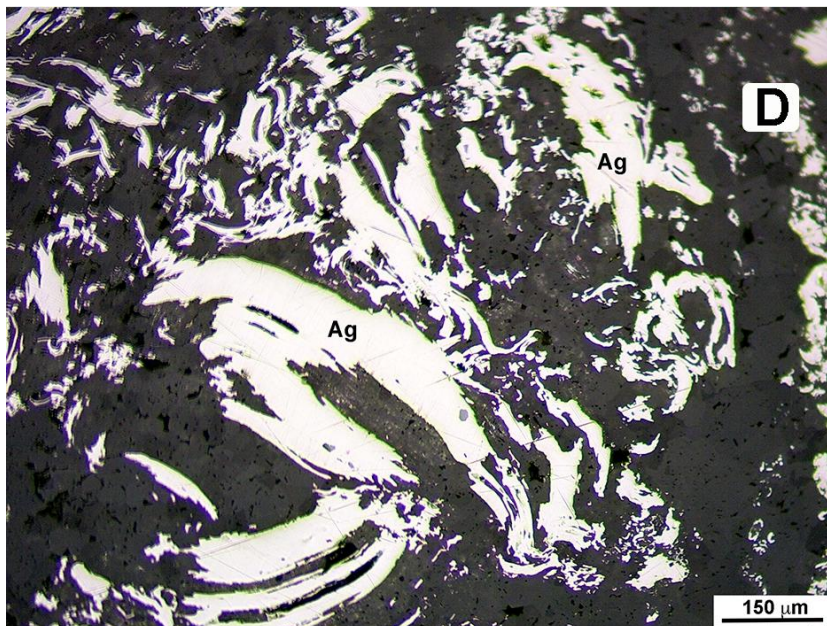
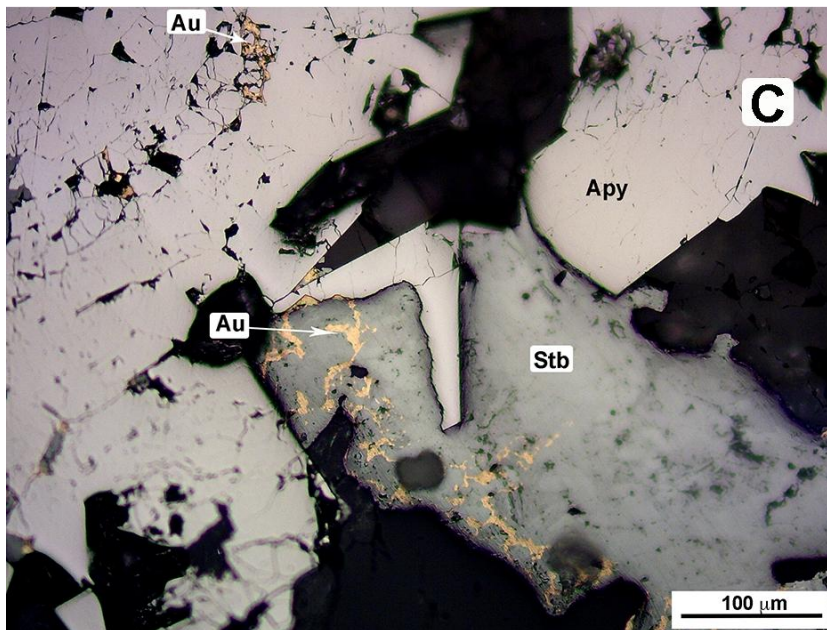


Los elementos nativos: oro, plata y cobre se caracterizan por su baja dureza de pulido (por lo que frecuentemente están bastante rayados), por su alta reflectividad y por su isotropía. El oro puede tener tamaños submicroscópicos en muchas mineralizaciones, a veces sin embargo se encuentra en cristales de mayor tamaño, observables al microscopio.



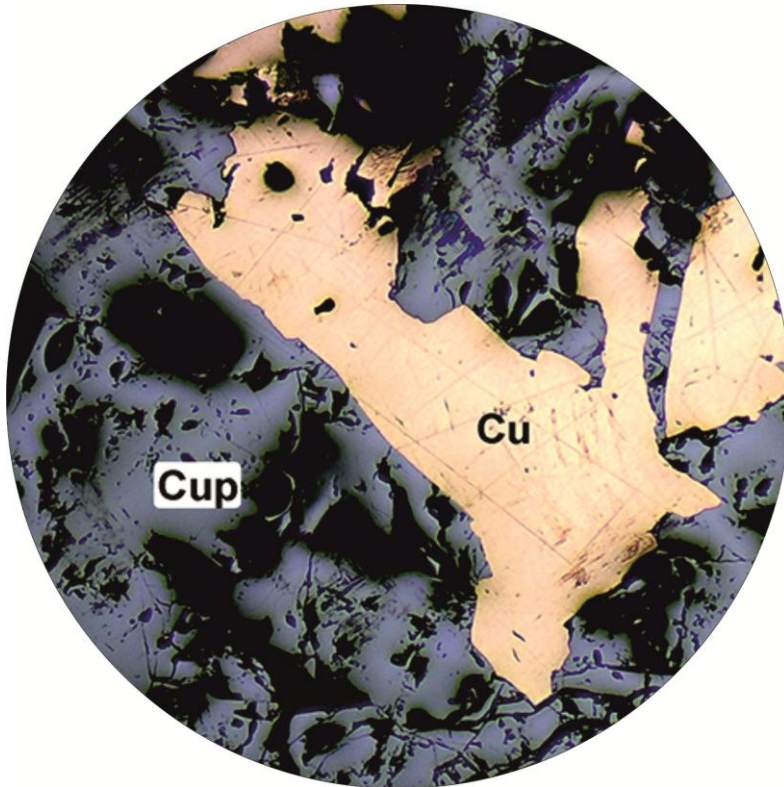
A: Oro (Au) con arsenopirita (Apy). Se puede observar el color amarillo muy brillante del oro que lo diferencia de la calcopirita (ésta es además anisótropa). La arsenopirita presenta las morfologías rómbicas características.

B: Otro ejemplo de oro (Au) con arsenopirita (Apy) en la que destaca la mayor reflectividad del oro con respecto a la arsenopirita. La ganga es cuarzo (Qtz).



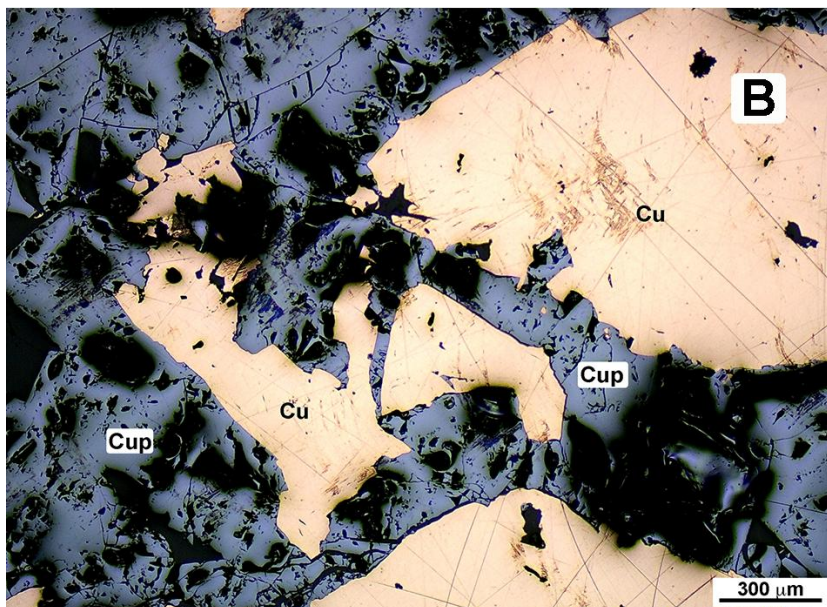
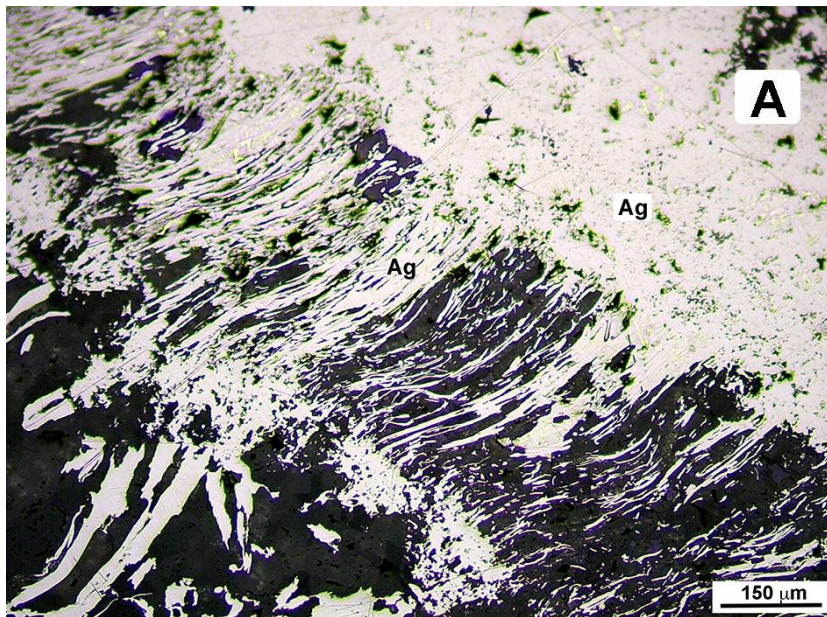
C: Asociación de oro (Au) con stibnita (Stb) y arsenopirita (Apy). En este caso el oro se asocia a la stibnita, mientras la arsenopirita sería el mineral mas temprano de la paragénesis. La muestra procede de la mina Mari Rosa, en Extremadura (España).

D: Plata nativa (Ag) procedente de Chañarcillo (Chile). Se reconoce por su alta reflectividad, color blanco, baja dureza e isotropía. Es frecuente el hábito hojoso.



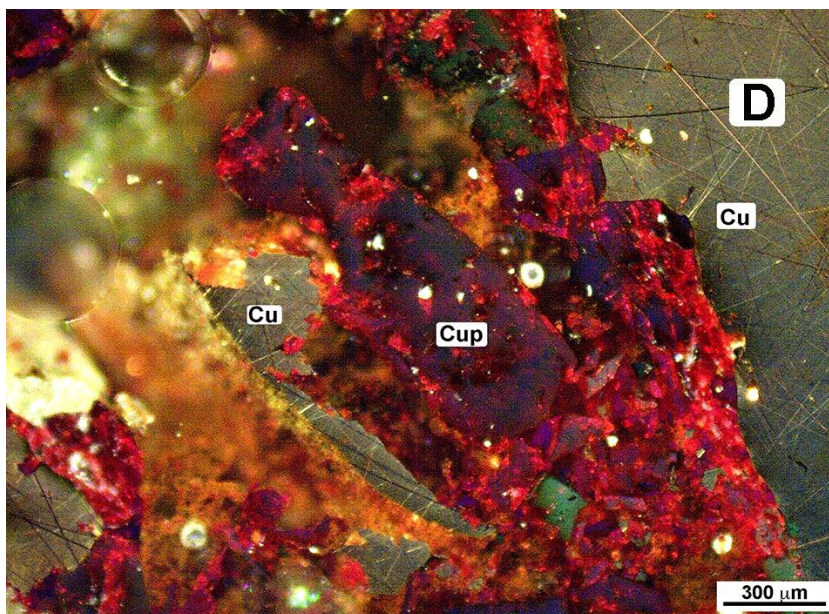
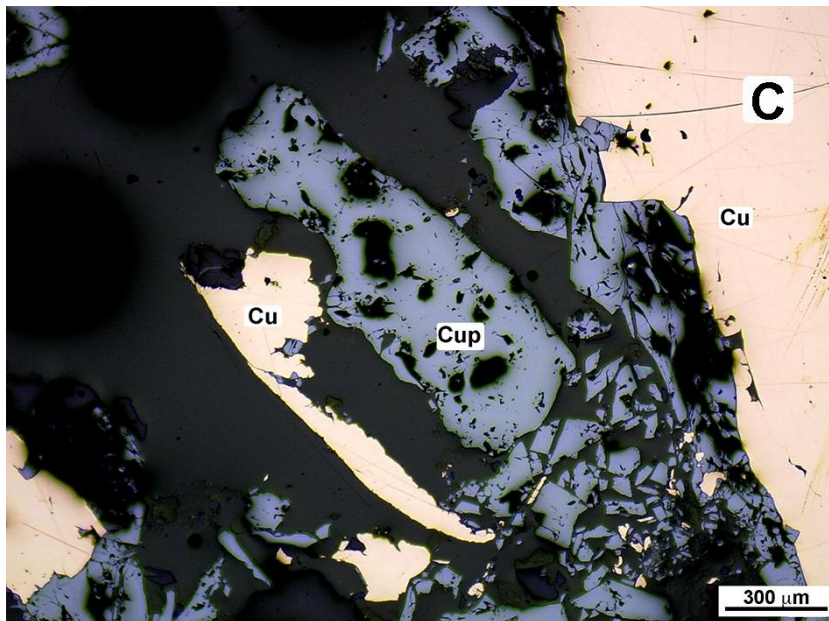
Metales nativos (Au, Ag y Cu) (2)





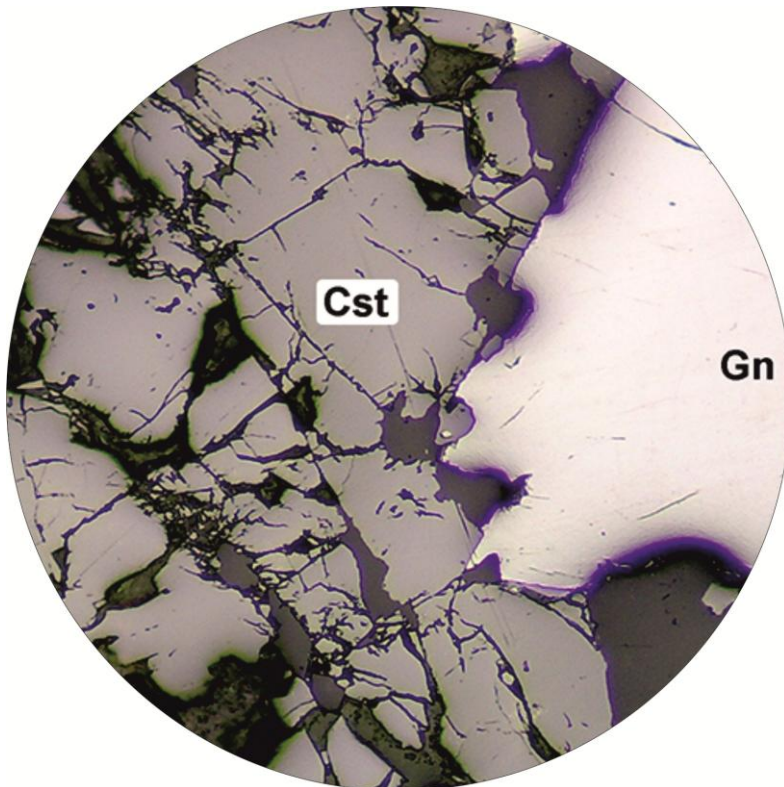
A: Muestra de plata nativa (Ag). En este caso los cristales tienen mayor tamaño que en la imagen de la lámina anterior, alternando con minerales de la ganga.

B: Muestra de cobre nativo (Cu): El cobre nativo tiene color rojizo y al igual que oro y plata tiene alta reflectividad, es isótropo y de dureza baja. En la muestra está asociado a cuprita (Cup) óxido de cobre, de color gris azulado y reflectividad baja.



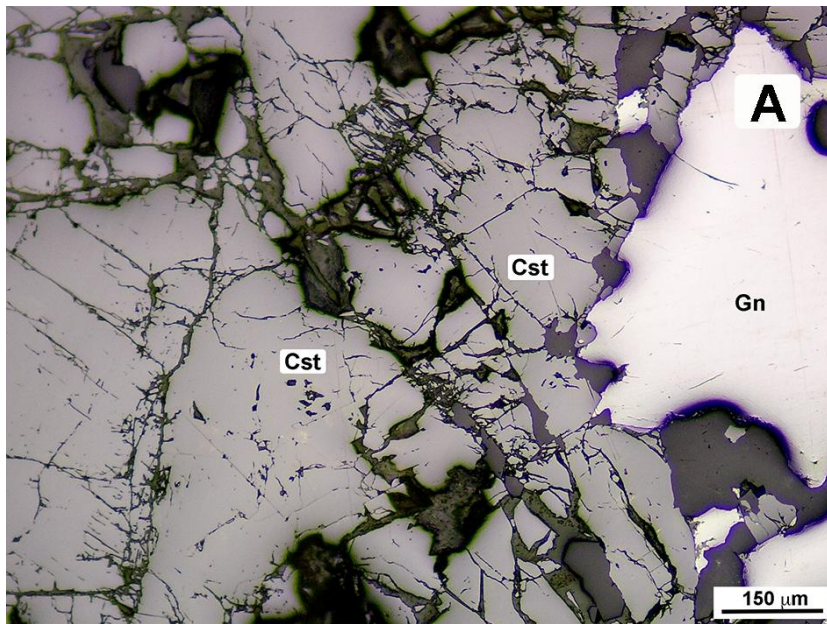
C: Otro ejemplo de asociación de cobre nativo (Cu) con cuprita (Cup). En los procesos de oxidación y enriquecimiento supergénico es frecuente que los óxidos de cobre estén asociados a cobre nativo.

D: Imagen anterior con dos polarizadores. La cuprita (Cup) se caracteriza por el color gris azulado, mayor dureza que el cobre (Cu), isotropía y reflexiones internas de color rojo intenso, como se observa en la imagen. Las reflexiones de color blanco amarillento corresponden a minerales de la ganga.



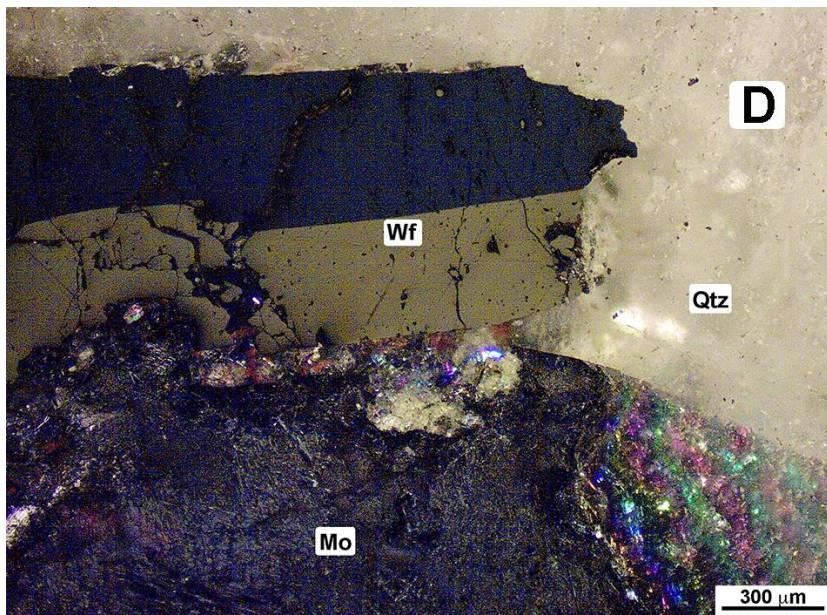
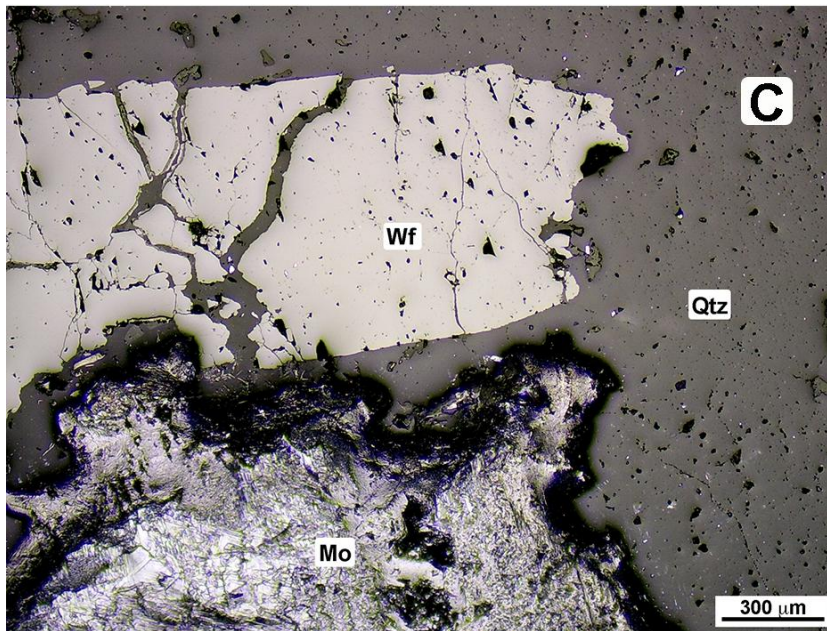
Fases minerales oxidadas





A: La casiterita (Cst) es el mineral de estaño mas común. Se caracteriza por su dureza y baja reflectividad. La anisotropía está enmascarada por las reflexiones internas, de color pardo muy abundantes. En la muestra se asocia a galena (Gn) ya descrito anteriormente, mineral de reflectividad media alta y de dureza baja. En la muestra se puede observar la casiterita fracturada y galena relleno de huecos, lo que indica su cristalización posterior a la casiterita.

B: Imagen anterior con dos polarizadores. Las reflexiones internas de la casiterita (Cst) de colores de pardo a caramelo son características de este mineral. La galena (Gn) es isotrópica.



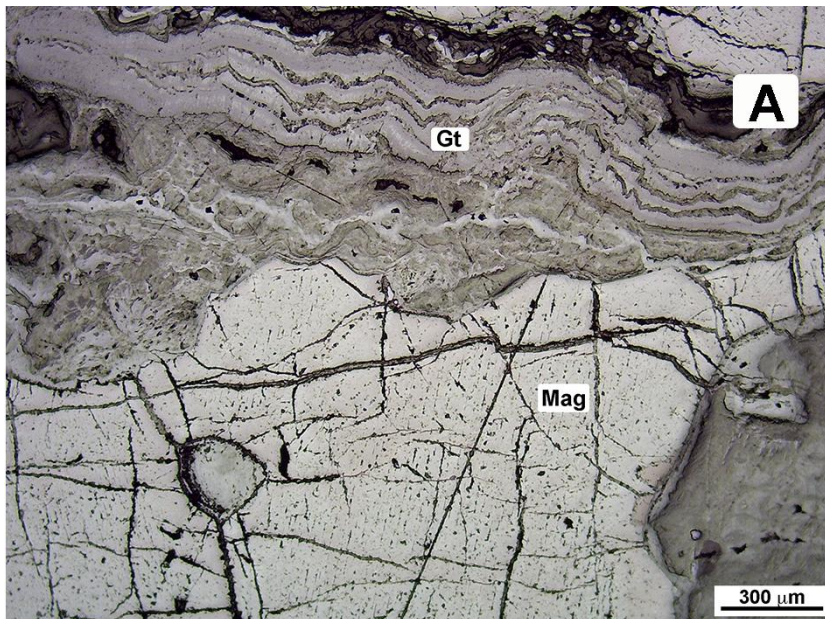
C: La wolframita (Wf) es el mineral mas importante de wolframio (tungsteno). Tiene reflectividad baja (pero mayor que casiterita), gris con tonos marrones, dureza alta, pero menor que casiterita, y frecuentemente presenta hábitos prismáticos en el microscopio que ayudan a identificarla. En la imagen está asociada a una sección basal de molibdenita (Mo) que se reconoce por el mal pulido del cristal, debido a la exfoliación. La ganga es cuarzo (Qzt), mineral apenas reflectivo.

D: Imagen anterior con dos polarizadores. Se puede observar la anisotropía de la wolframita (Wf) ya que en este caso está maclada. Puede tener reflexiones internas, pero mucho menos que la casiterita.

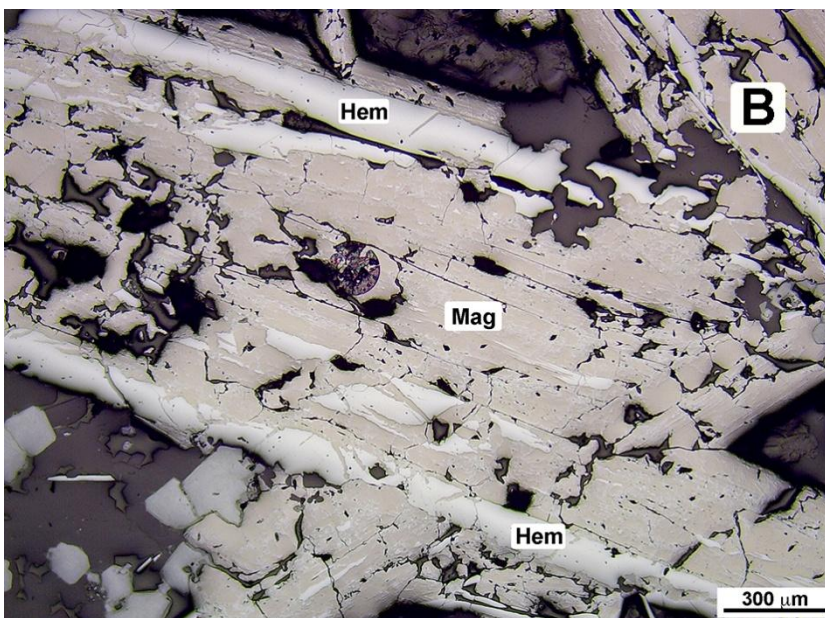


Óxidos y oxihidróxidos de Fe



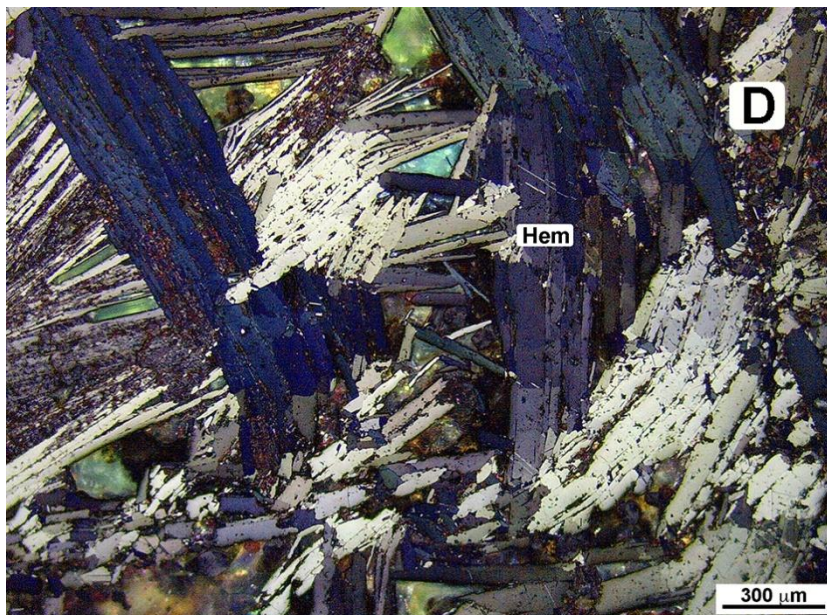


Los óxidos y oxihidróxidos de hierro son abundantes en muy diferentes tipos de mineralizaciones, desde los yacimientos magmáticos e hidrotermales de sulfuros que han sido sujetos a procesos supergénicos oxidativos, a los de tipo BIF o las zonas de oxidación.



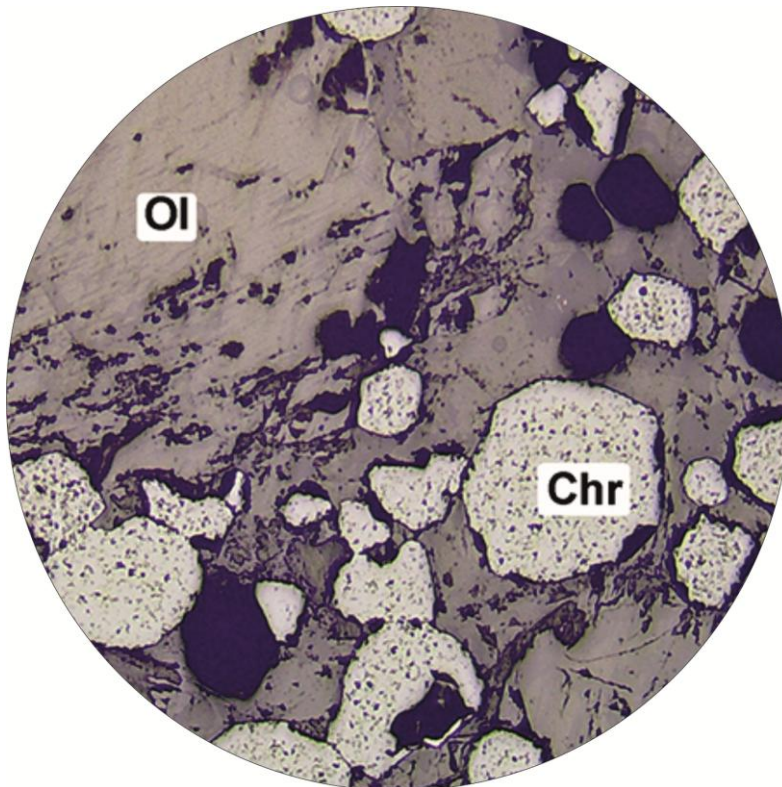
A: En la imagen, se puede observar magnetita (Mag), de tonos marrones, fracturada y parcialmente alterada, junto a goethita (Gt), de tono gris azulado, con texturas colomorfas, características de los productos de alteración supergénica.

B: Magnetita (Mag) gris con tonos marrones, junto a hematites (Hem) gris de tonos mas claros. Es frecuente la transformación de magnetita a hematites en los procesos en los que hay oxidación y el hierro ferroso pasa a férrico.



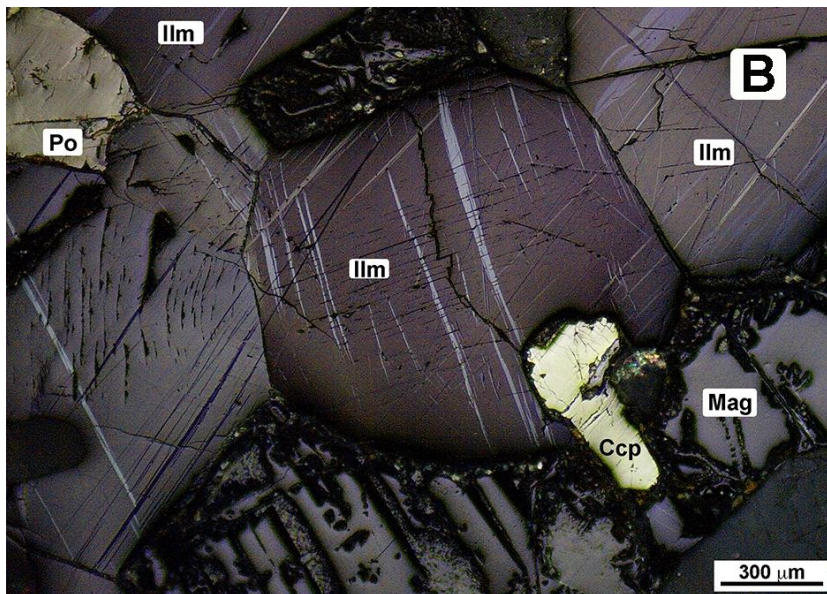
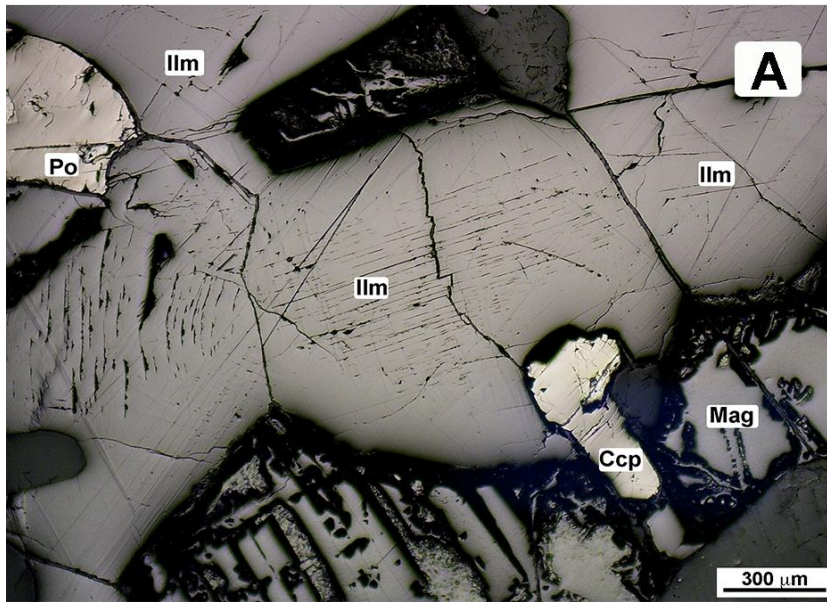
C: Mineralización de Fe con hematites (Hem), con hábito tabular característico.

D: Imagen anterior con dos polarizadores. Se puede observar la anisotropía de hematites (Hem). Las reflexiones internas, son menos abundantes que en la goethita, lo cual es una de las propiedades que los diferencian.



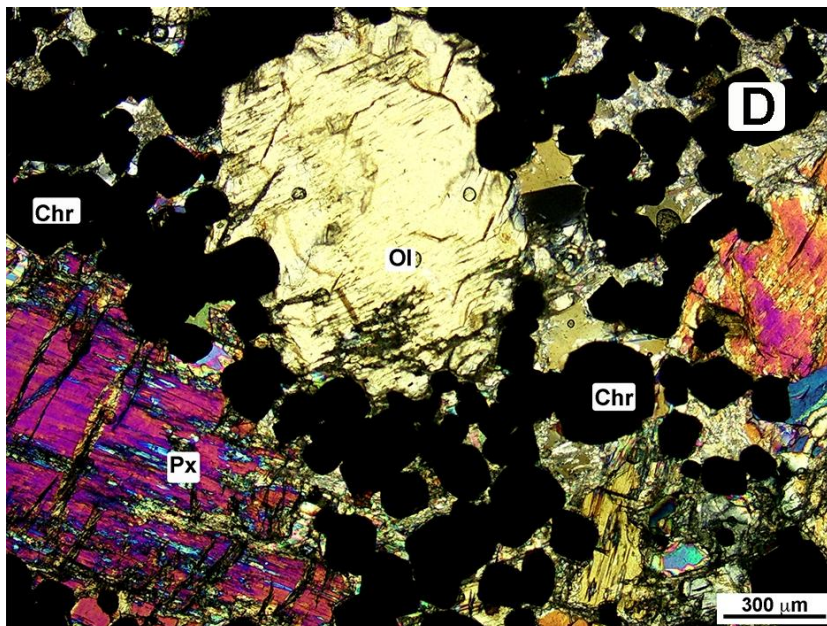
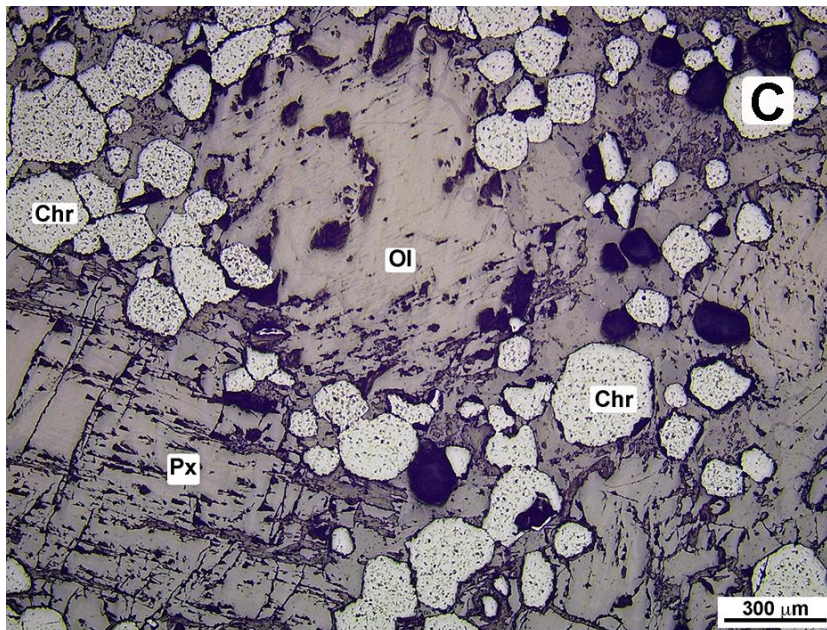
Otras fases minerales oxidadas





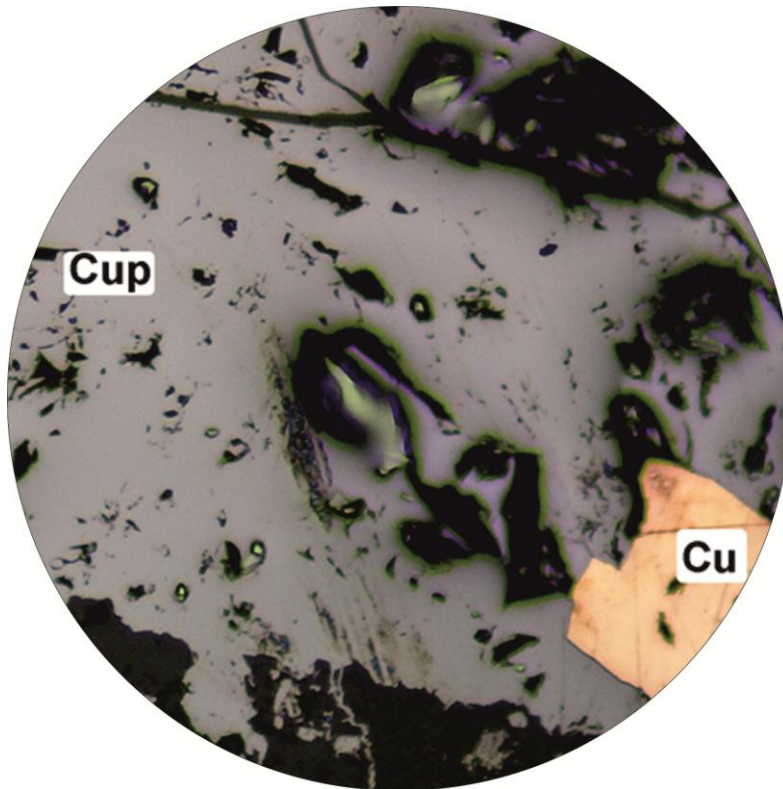
A: La ilmenita (Ilm) se encuentra en yacimientos de origen magmático, asociada frecuentemente a magnetita (Mag) de la que se diferencia por un tono mas rosado y la anisotropía. En este tipo de yacimientos se puede asociar con sulfuros de cobre y hierro como calcopirita (Ccp) y pirrotina (Po).

B: Imagen anterior con dos polarizadores parcialmente cruzados. Se observa la anisotropía y las maclas en los cristales de ilmenita.



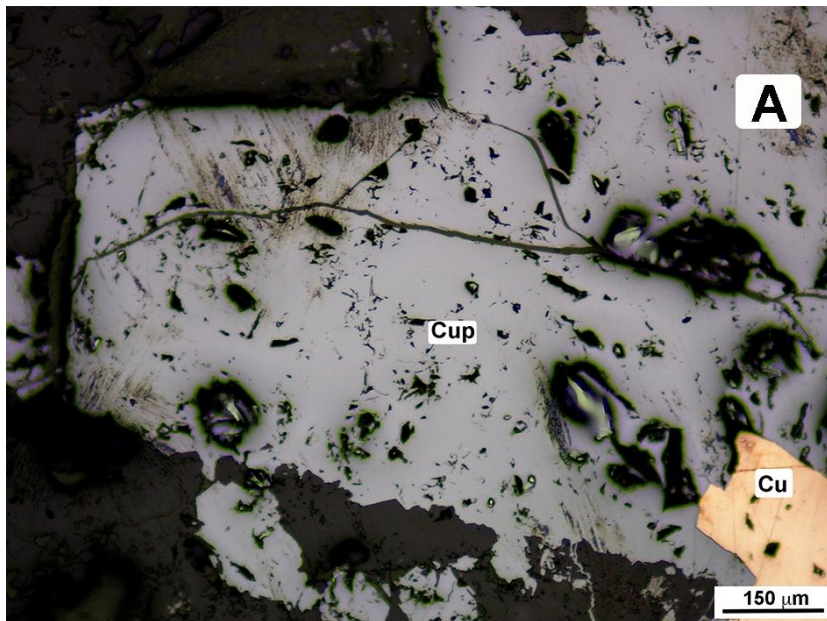
C: La cromita (Chr) es otro de los óxidos que se forman en los yacimientos magmáticos, en rocas básicas y ultrabásicas. En las paragénesis es frecuentemente el único mineral opaco presente. Se reconoce por sus hábitos cúbicos en agregados. Aparece junto a piroxeno (Px) y olivino (Ol), que se observan bastante mas oscuros como corresponde a minerales transparentes.

D: Imagen anterior tomada con luz transmitida y dos polarizadores. Cromita (Chr) oscura como corresponde a un mineral opaco. En el piroxeno (Px) se puede observar la exfoliación, que lo diferencia del olivino (Ol).



Óxidos de cobre



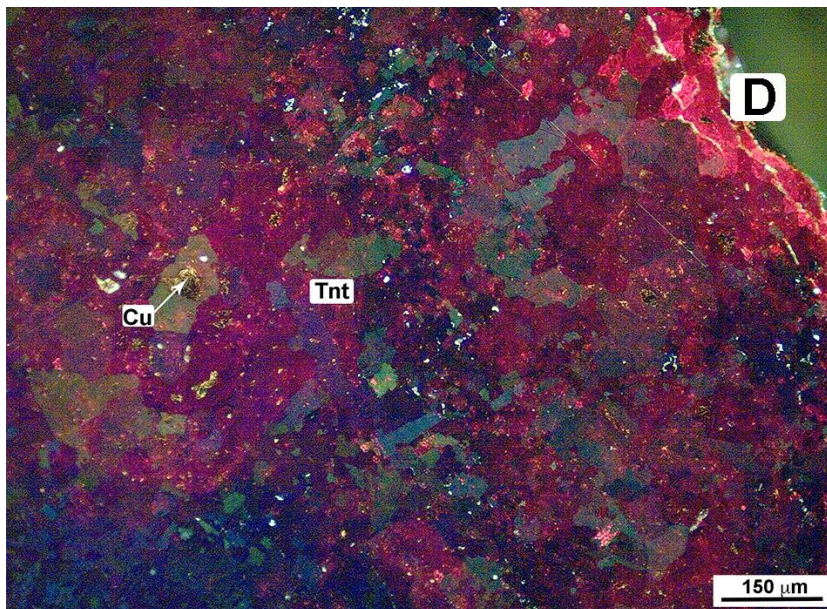
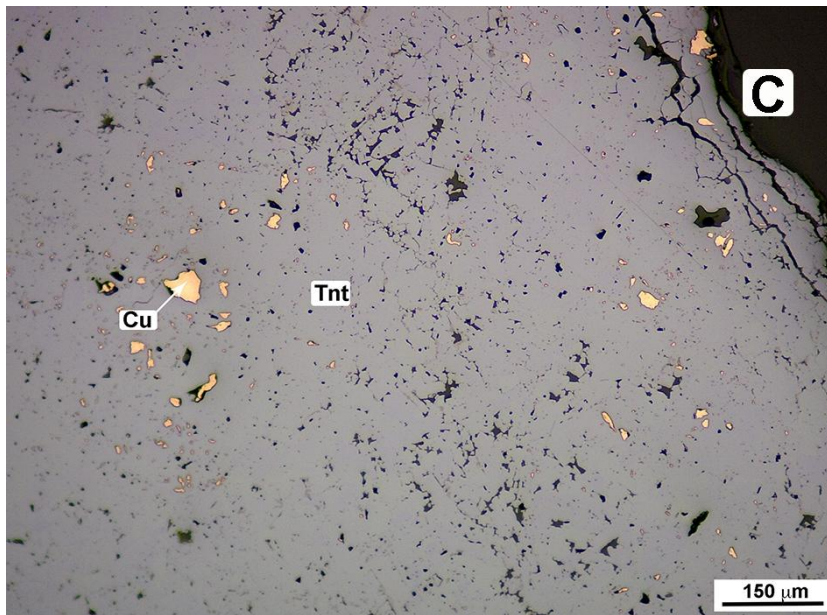


Junto con la cuprita (Cu_2O) y tenorita (CuO) en la zona de oxidación también se forman los llamados “cobres verdes”, que incluye una larga familia de sulfatos, oxiclорuros, carbonatos, etc.



A: En los procesos de oxidación de minerales de cobre, se forma cobre nativo (Cu) que suele estar acompañados de óxidos, en este caso cuprita (Cup) Cu_2O , mas dura que el cobre y de color gris azulado.

B: Imagen anterior con dos polarizadores. La cuprita (Cup) es isótropa, aunque puede tener anisotropía anómala y presenta abundantes reflexiones internas de color rojo.



C: Otro de los óxidos que se forman en los procesos de oxidación es la tenorita (Tnt) CuO , con una menor relación cobre oxígeno que la cuprita. El color es gris, sin los tonos azulados de la cuprita. Está también asociado a cobre nativo (Cu).

D: Imagen anterior con dos polarizadores. Se puede observar la fuerte anisotropía de la tenorita (Tnt) y la menor presencia de reflexiones internas.

Algunos tipos de yacimientos minerales seleccionados

A continuación se describe la mineralogía principal y texturas minerales presentes en algunos de los tipos de yacimientos mas conocidos que estudian los alumnos de Recursos Minerales de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad complutense de Madrid.

- Se describen las texturas de los **yacimientos magmáticos de Cr (Pt)** tanto de complejos estratificados (Bushveld) como de ofiolitas (Grecia, Galicia y Bou Azzer). Los yacimientos de cromita de las Cordilleras Béticas (Carratraca y Ojén) se caracterizan por una asociación mineral menos común, de cromita con niquelina.
- Las mineralizaciones de **sulfuros magmáticos de Ni-Cu** presentan todas ellas bastantes analogías en sus texturas y paragénesis. Las muestras presentadas proceden de los yacimientos de Pechenga (Rusia), Aguablanca (Badajoz, España).
- Los yacimientos **magmáticos de Fe-Ti** de Bushveld (Sudáfrica) y Agracha (Marruecos).
- A continuación, se muestran imágenes de los **yacimientos de W** de Panasqueira (Portugal) y Mina Teba (España) y del **skarn de Au-Cu** de Carlés en Asturias.
- Los ejemplos de los **yacimientos de tipo pórfido cuprífero** se describen en los apartados de Chuquicamata y Andacollo (Chile) y los de **epitermales**

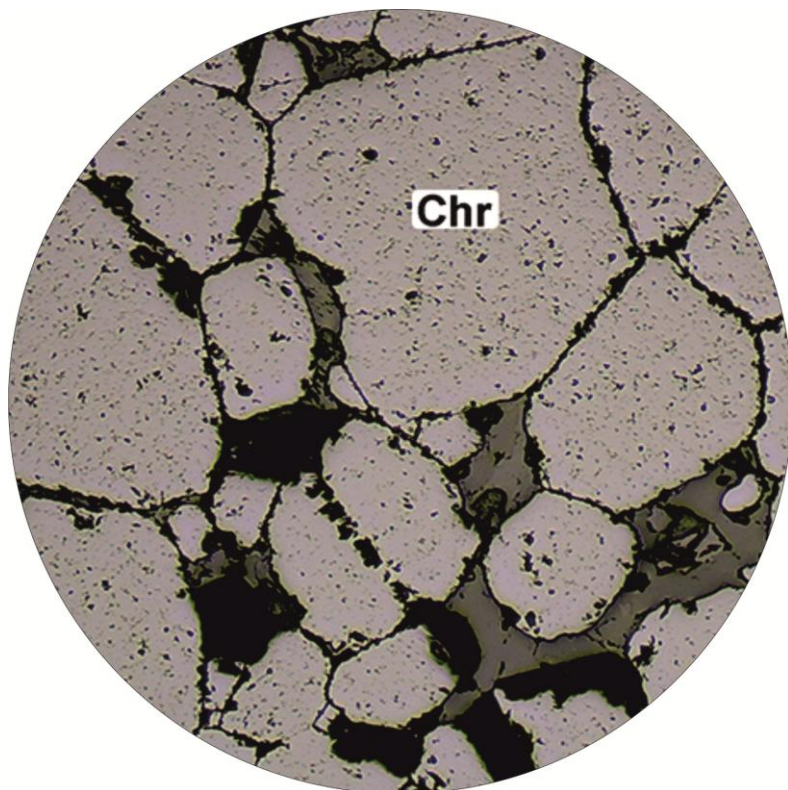
de alta sulfuración que pueden estar relacionados con los primeros, se muestran en los apartados de El Indio (Chile) y Rodalquilar (España).

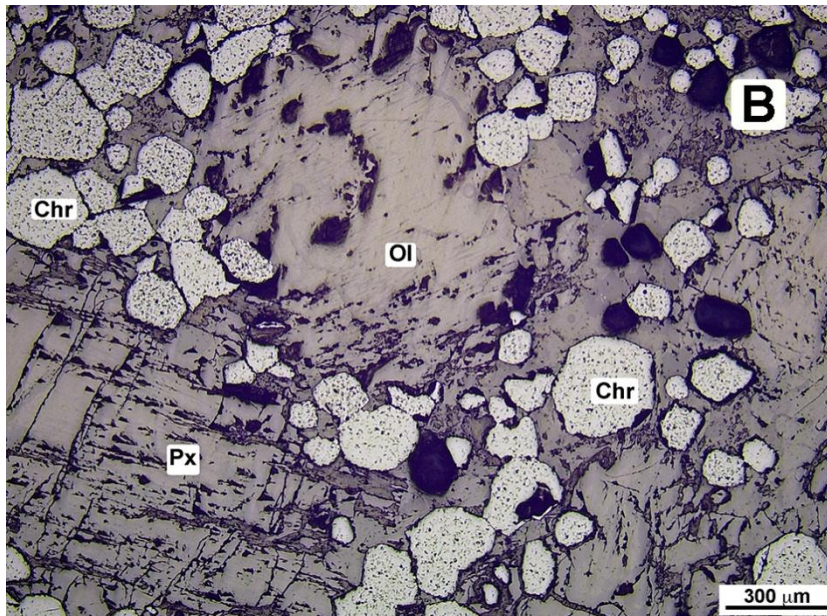
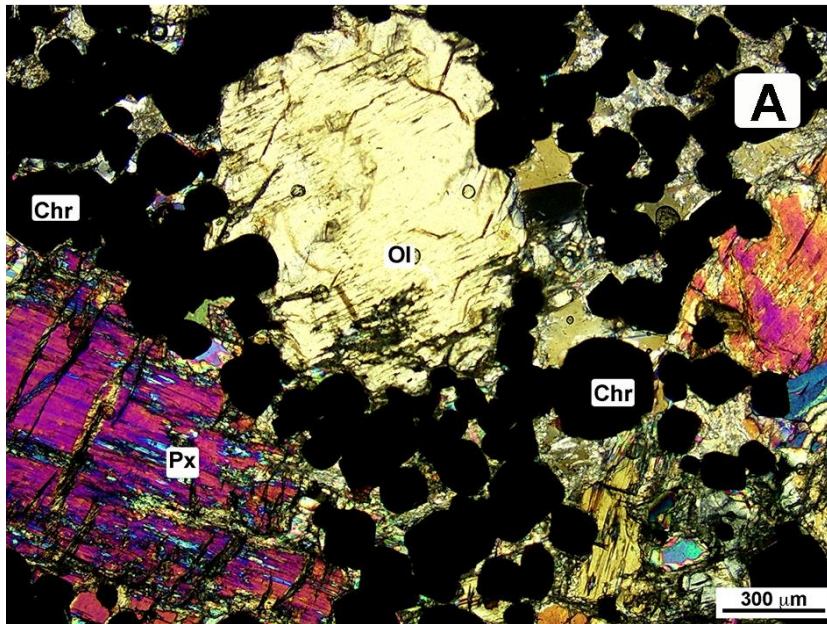
- De los **yacimientos vulcano sedimentarios (VHMS)** se han escogido muestras de la mina de Neves Corvo (Portugal) que presenta unas paragénesis muy variadas en las que destacan la presencia de minerales de Sn, junto con los sulfuros clásicos.
- Las texturas de **yacimientos mesotermales de Au**, en corteza continental se pueden observar en el apartado de Salsigne (Francia).
- Las **mineralizaciones de Pb-Zn** se muestran en el apartado de Reocín (Cantabria, España), y son del tipo **Mississippi Valley (MVT)**; estas mineralizaciones se conocen también como de **Tipo Alpino** en Europa.
- Finalmente, muestran ejemplos del distrito aurífero mas importante del mundo en el apartado de Witwatersrand (Sudáfrica).

Las imágenes que vienen a continuación son solo un pequeño ejemplo de las características texturales que podemos encontrar en las diferentes mineralizaciones y la importancia que pueden tener en la viabilidad de los procesos metalúrgicos de separación mineral, por sus tamaños de grano y por los intercrecimientos que pueden darse entre las distintas fases minerales.

Para aquellos que quieran profundizar en estos conocimientos, al final del documento, se dan algunas referencias bibliográficas generales y de cada uno de los yacimientos descritos.

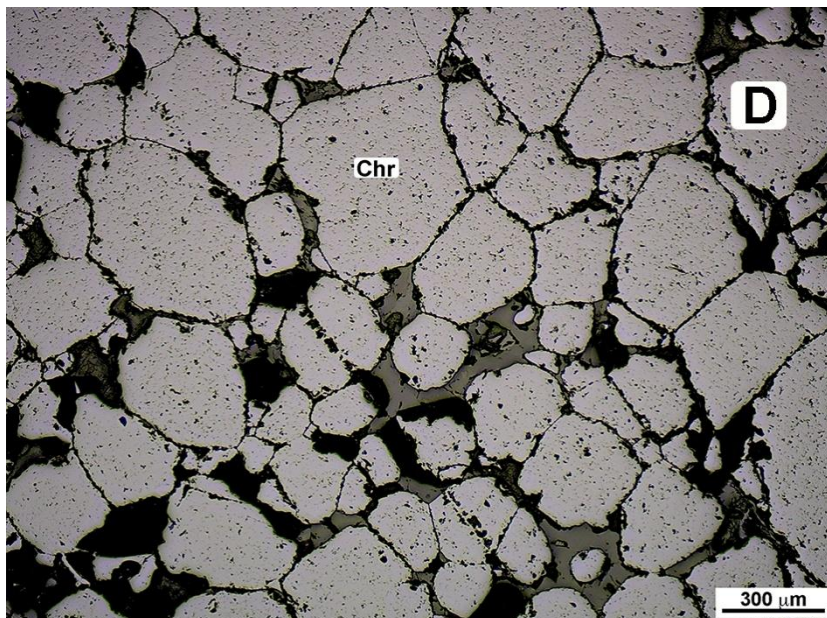
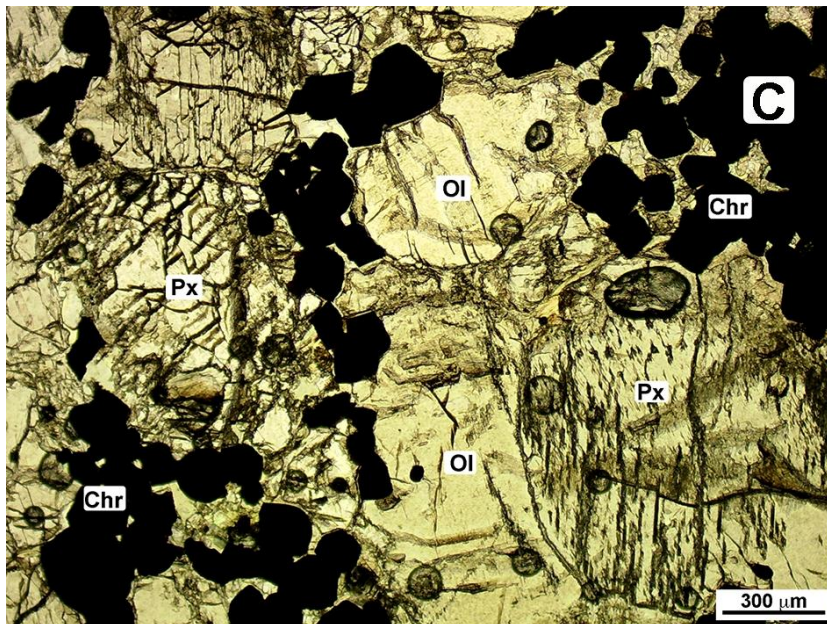
Yacimientos magmáticos de cromo-platinoides. Bushveld (Sudáfrica)





A: Imagen con luz transmitida y dos polarizadores. Se puede observar la paragénesis de olivino (Ol), piroxeno (Px) y cromita (Chr) que es el mineral redondeado subidiomorfo y opaco. Es relevante que olivino y piroxeno no están alterados ni fracturados, conservan sus texturas originales.

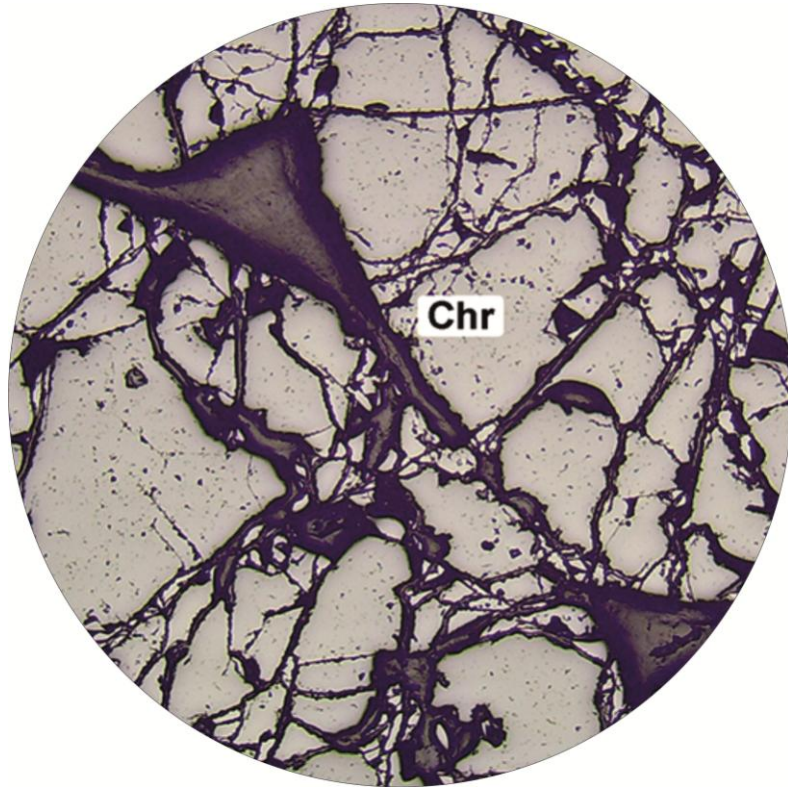
B: Imagen anterior con luz reflejada. La cromita presenta tendencias idiomorfas, intercrecida con olivino (Ol) y piroxeno (Px).

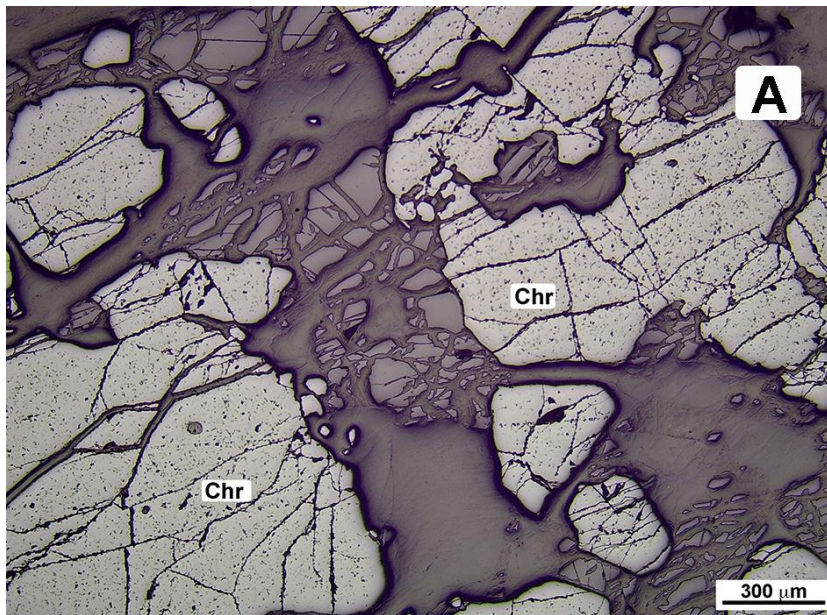


C: Imagen con luz transmitida y un polarizador de la mineralización. Se distinguen bandas de cromita (Chr) (opaco) entre los piroxenos (Px) y olivinos (Ol). Esos bandeados se pueden observar a todas las escalas del yacimiento.

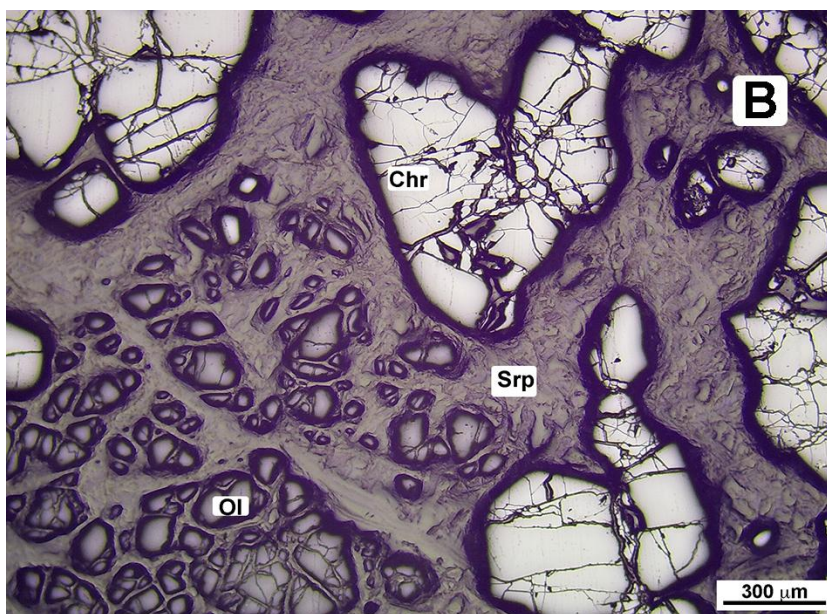
D: Imagen de cromita (Chr) masiva (luz reflejada). En este caso los agregados de cristales de cromita ocupan prácticamente todo el campo visual.

Yacimientos de cromo en ofiolitas. Galicia (España), Mina del Águila (Grecia) y Bou Azzer (Marruecos)



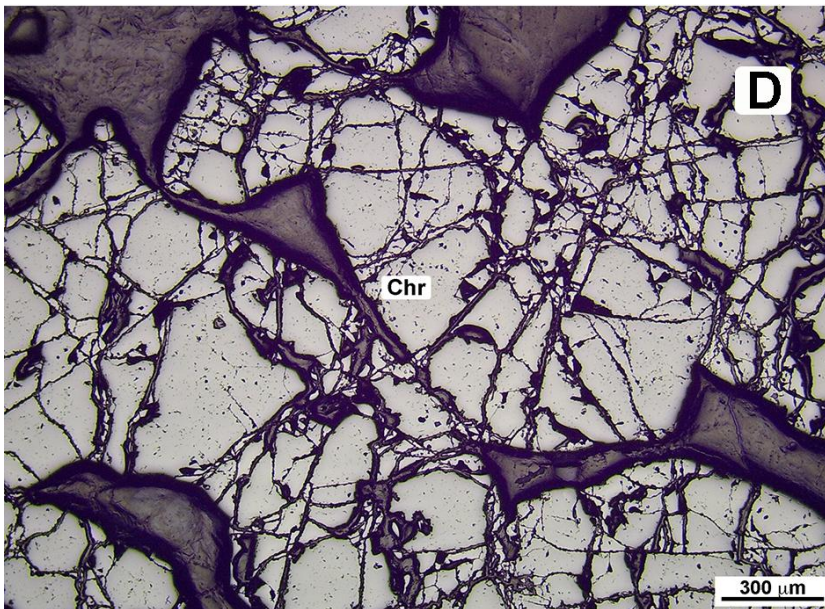
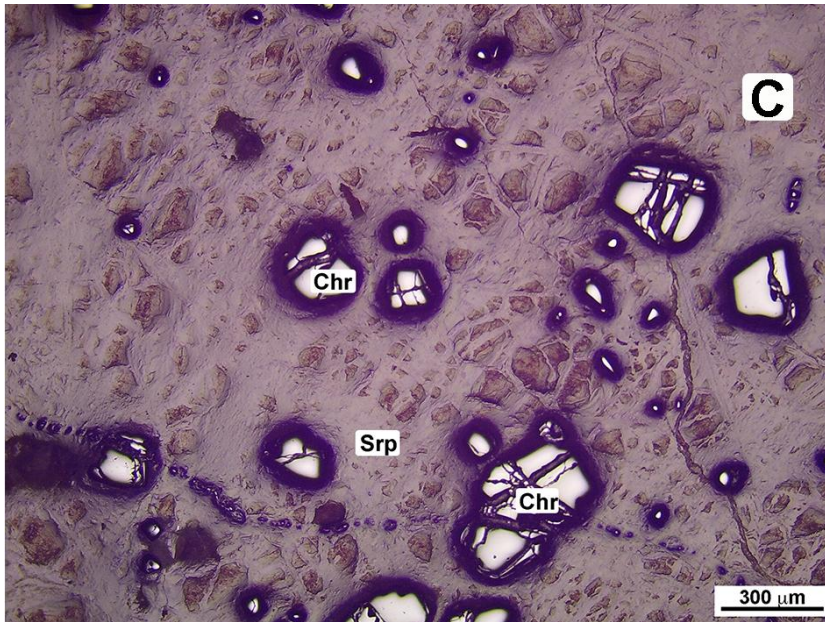


Una de las características de los yacimientos de cromita en ofiolitas es la fracturación y alteración que presentan los minerales primarios. La cromita se conserva sin alteraciones pero muy fracturada, mientras que suele haber una importante serpentinización de olivino y piroxeno.



A: Ofiolita procedente de Herbeira (Galicia, España). la cromita (Chr) está fracturada y la roca encajante está serpentinizada.

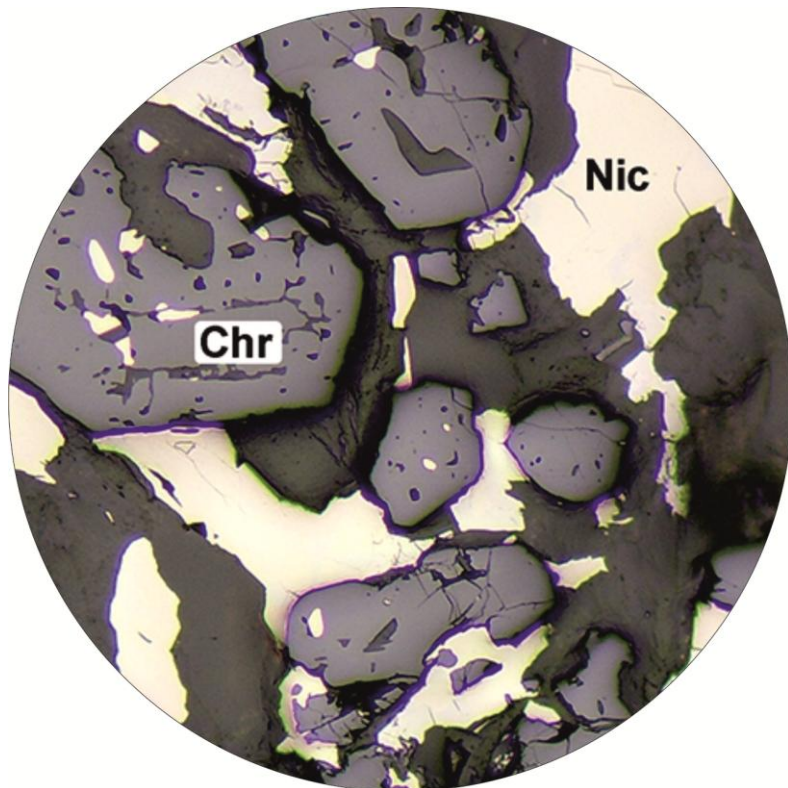
B: Cromitas (Chr) fracturadas de la Mina del Águila en Grecia. Se pueden observar restos de olivino (Ol), parcialmente alterados a serpentina (Srp).

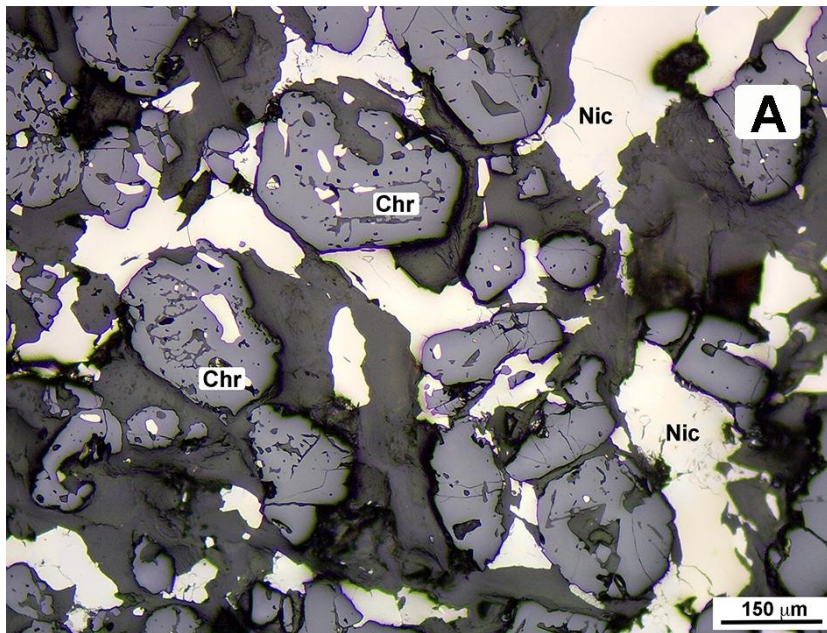


C: Muestra de ofiolita en Bou Azzer (Marruecos). La roca es serpentina (Srp) en la que quedan algunos restos de olivinos. La cromita (Chr) en pequeños cristales, presenta la fracturación característica.

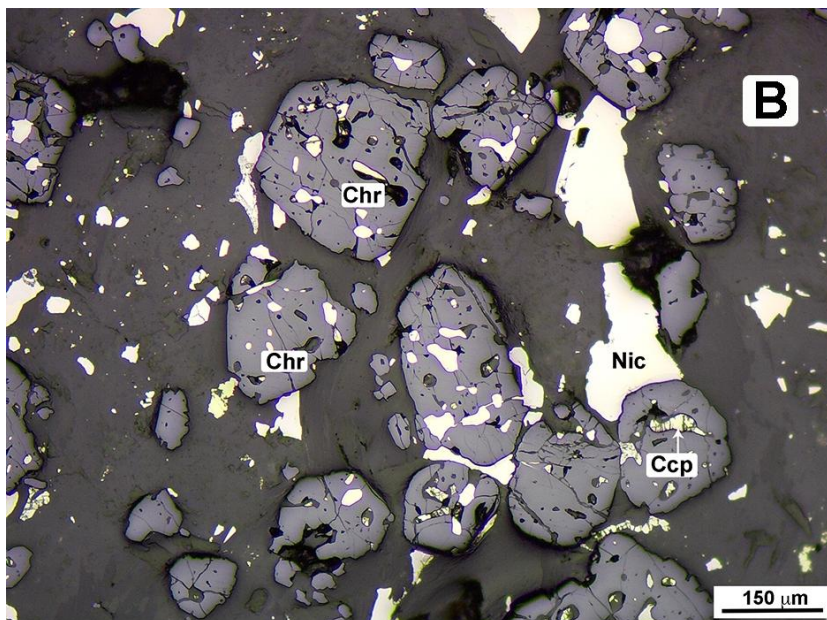
D: Cristales de cromitas (Chr) fracturadas en la Mina del Águila de Grecia. En este caso la muestra es prácticamente cromita masiva.

Yacimientos de cromo y niquelina. Ojén y Carratraca (Málaga, España)



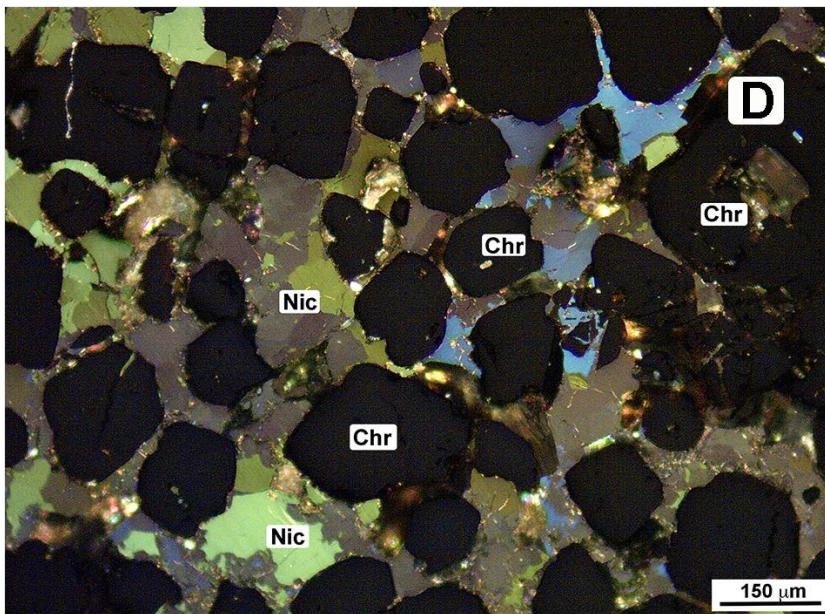
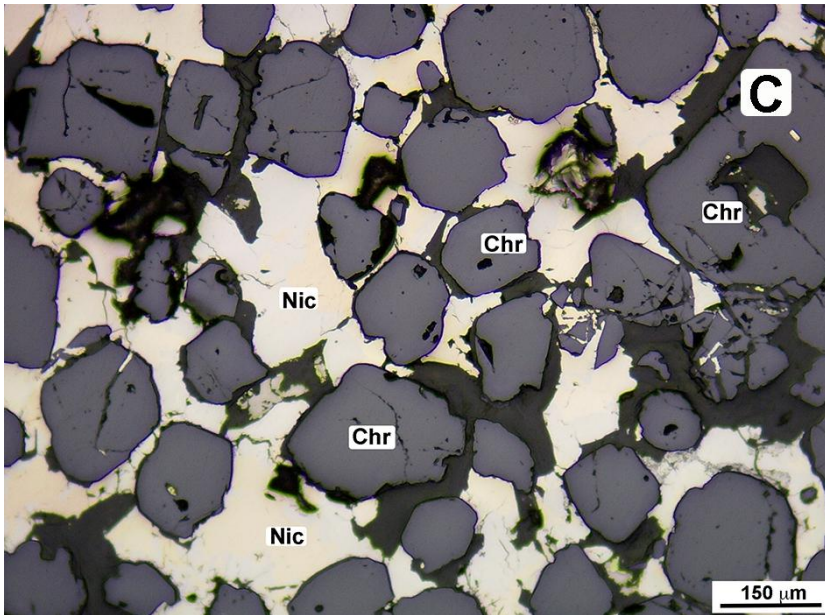


Las mineralizaciones de cromo de las cordilleras Béticas se caracterizan por la asociación cromita y niquelina junto con cordierita, que no es muy común en este tipo de mineralizaciones.



A: Agregados idiomorfos de cromita (Chr) con cristales intergranulares de niquelina (Nic). En esta paragénesis es abundante la cordierita como mineral de la ganga.

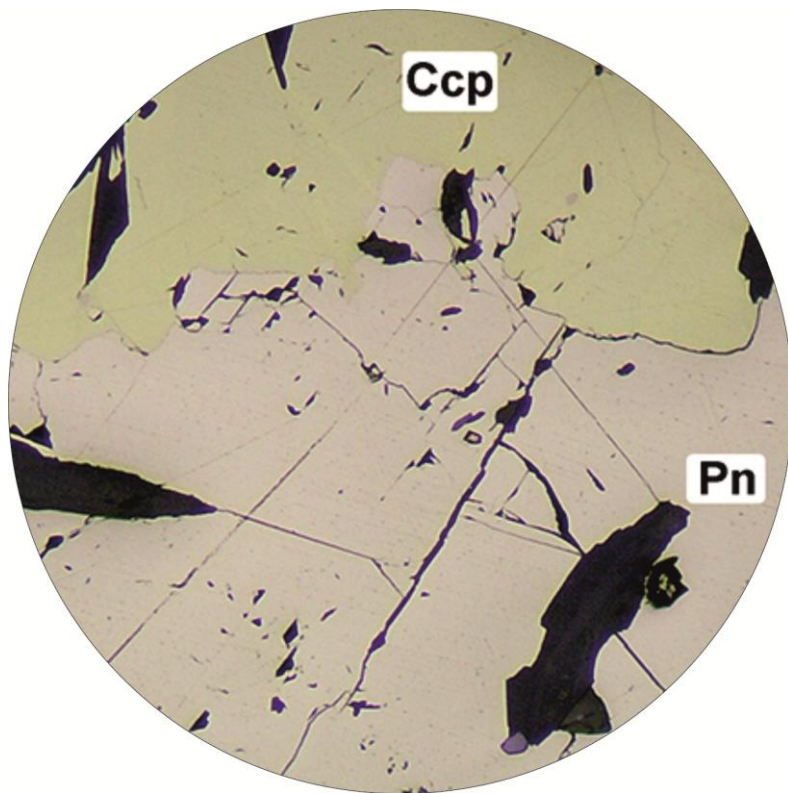
B: Agregados de cristales idiomorfos de cromita (Chr) que presentan inclusiones de calcopirita (Ccp) y niquelina (Nic). En este caso los minerales transparentes (probablemente cordierita) son mas abundantes, y la niquelina tiene una menor presencia.

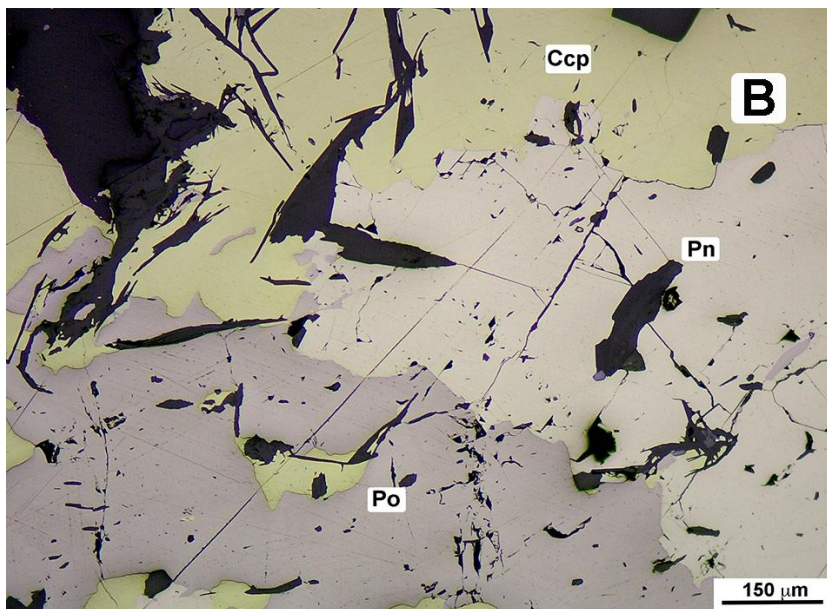
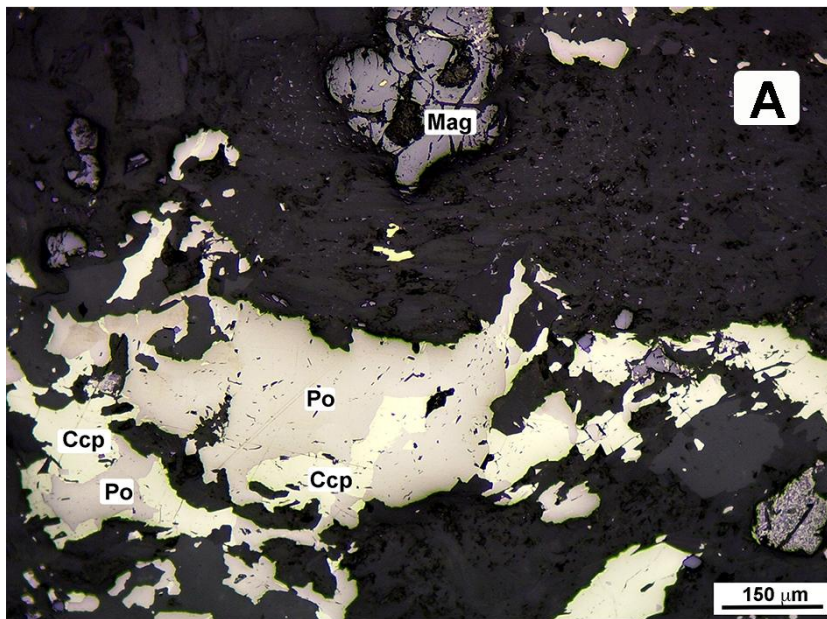


C: Muestra con cromita (Chr) y niquelina (Nic) como únicos minerales. Se puede observar la textura intergranular de la niquelina y las morfologías pseudocúbicas de la cromita.

D: Imagen anterior, con dos polarizadores. Se puede observar la isotropía de la cromita, de color negro y los colores variables de niquelina, de azules a verdosos, que corresponden a la fuerte anisotropía de este mineral.

Yacimientos magmáticos de Ni-Cu. Pechenga (Rusia) y Aguablanca (Badajoz, España)

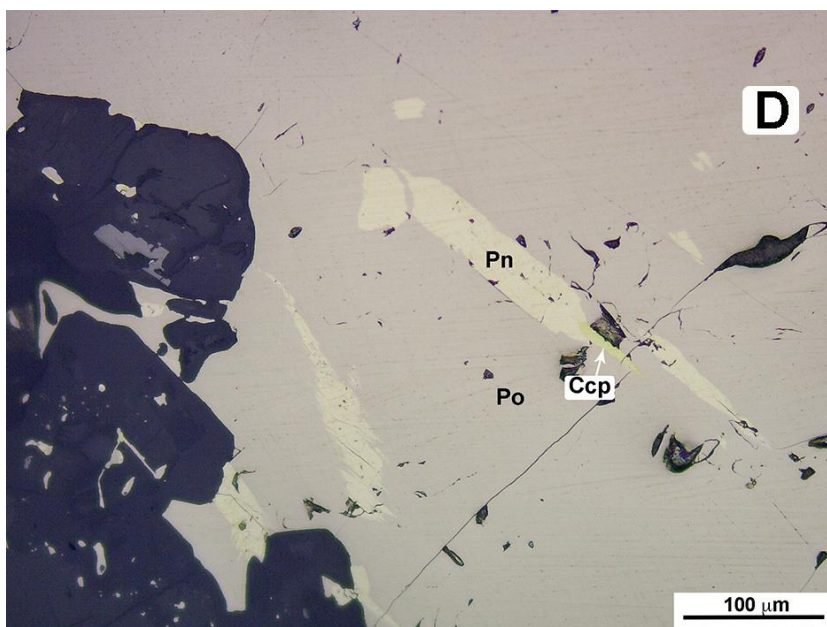
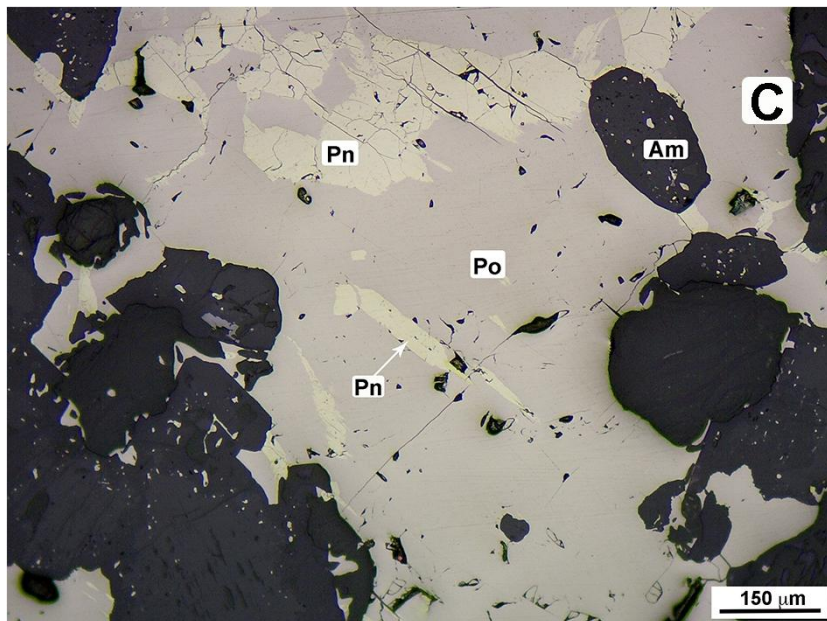




Los yacimientos de Cu-Ni se caracterizan por la presencia de tres minerales asociados (pirrotina, calcopirita y pentlandita) que se forman a partir de una solución sólida inicial que evoluciona a medida que desciende la temperatura. Pueden encontrarse minerales accesorios como magnetita, formados en los estadios iniciales del proceso mineralizador.

A: Mineralización de Aguablanca. Magnetita (Mag) con minerales de la ganga. Pirrotina (Po) y calcopirita (Ccp) en la parte inferior de la fotografía.

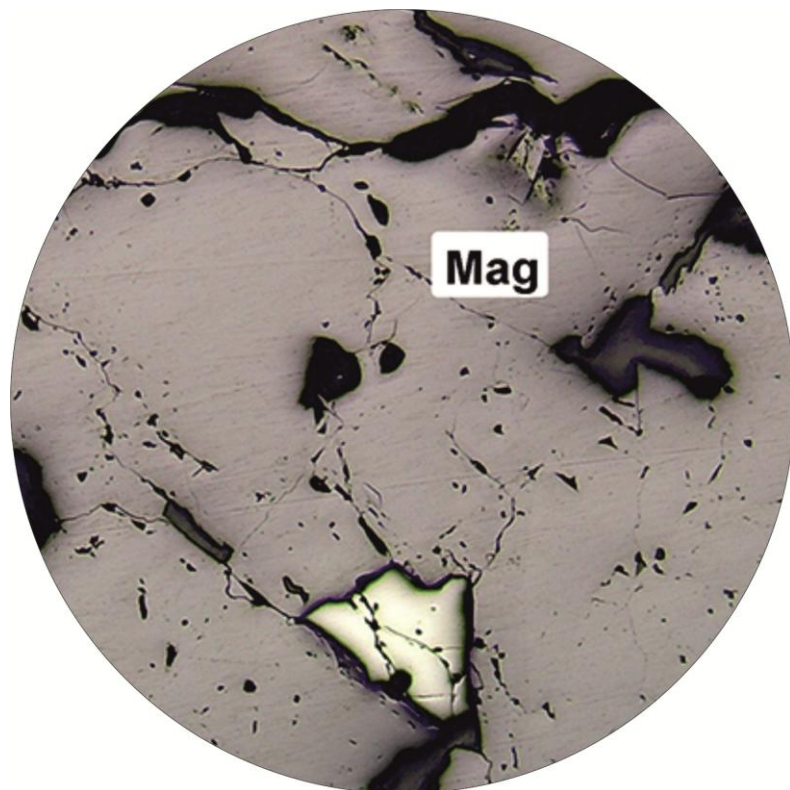
B: En el proceso de exsolución, se separan pirrotina (Po), pentlandita (Pn) y calcopirita (Ccp) que se suelen encontrar en granos bien desarrollados e intercrecidos entre si.

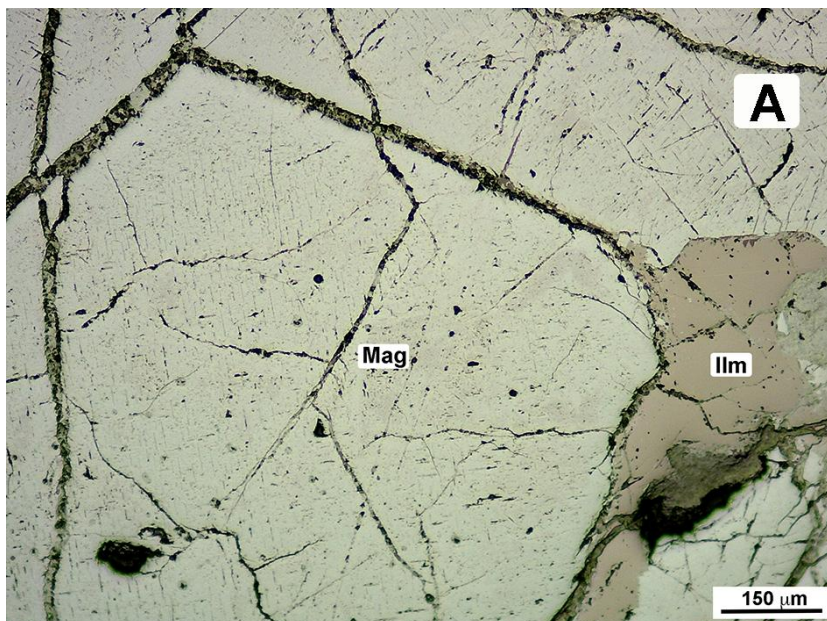


C: Mineralización de Pechenga. En los procesos mas tardíos, la exsolución de pentlandita y pirrotina se hace mas lentamente, al disminuir la capacidad de difusión con el enfriamiento. La pentlandita (Pn) queda en morfologías que se conocen como texturas "en flama" dentro de la pirrotina (Po). En la imagen se puede observar una sección basal de un anfíbol (Am), mineral que acompaña a los sulfuros.

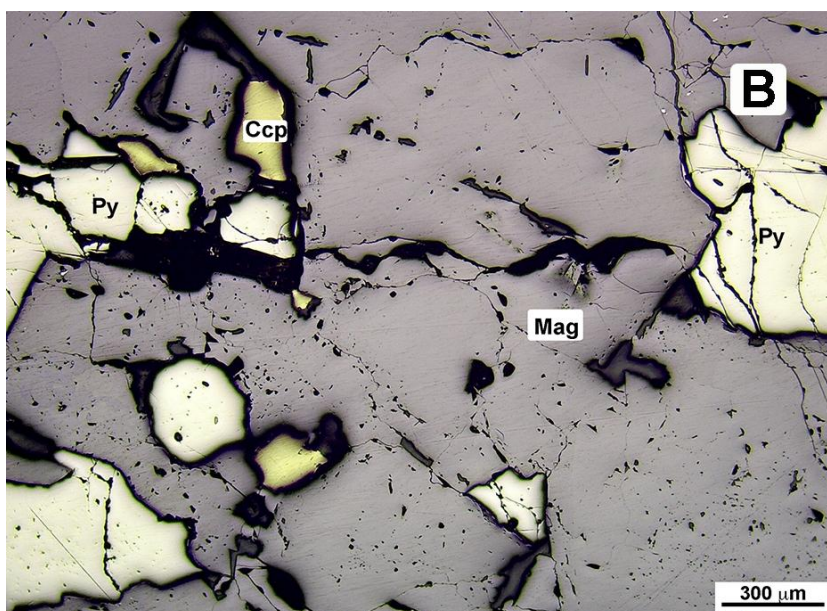
D: Detalle de la imagen anterior, en la que se observa mejor las texturas en flama de pentlandita (Pn) en pirrotina (Po).

Yacimientos magmáticos de Fe-Ti. Bushveld (Sudáfrica) y Agracha (Marruecos)



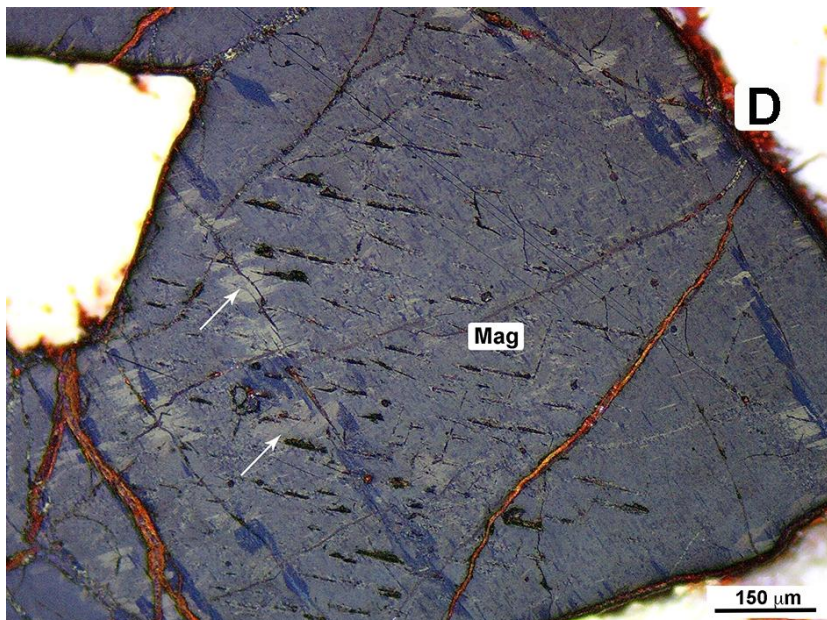
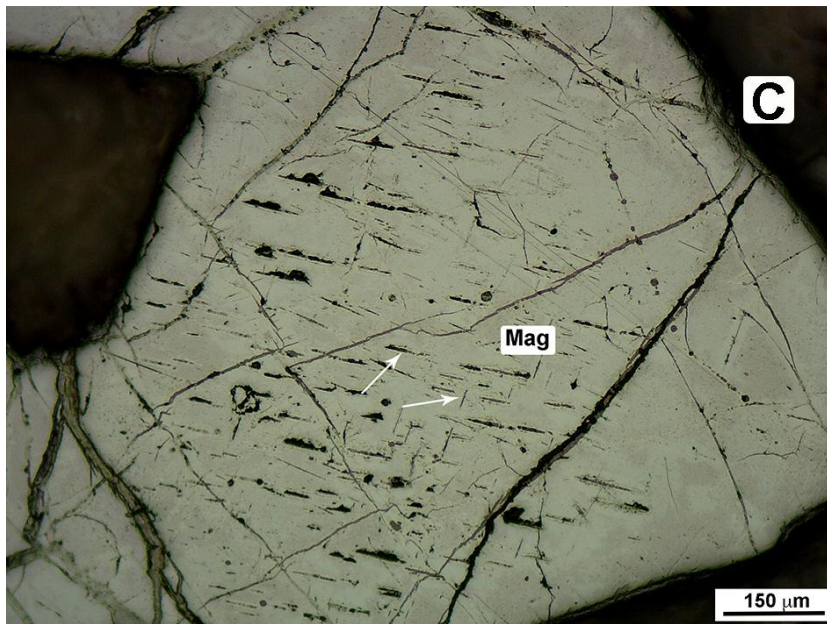


En yacimientos de origen magmático como Bushveld (Sudáfrica) y Agracha (Marruecos) se encuentran asociaciones de magnetita e ilmenita con algunos sulfuros como minerales accesorios.



A: Magnetita (Mag) e ilmenita (Ilm) cuando aparecen asociadas se diferencian por el tono más rosado de la ilmenita y por la anisotropía de ésta. La alteración de la magnetita a hematites (martitización) puede dar una impresión engañosa de anisotropía en la magnetita.

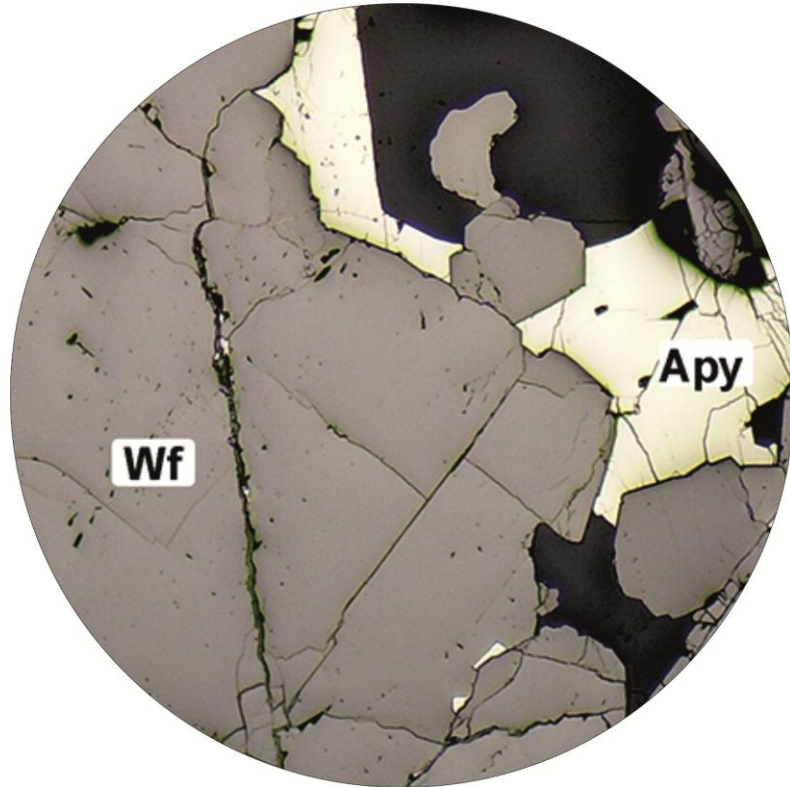
B: Es frecuente la coexistencia de fases oxidadas y sulfuradas de hierro. en la imagen se pueden observar magnetita (Mag) con calcopirita (Ccp) y pirita (Py).

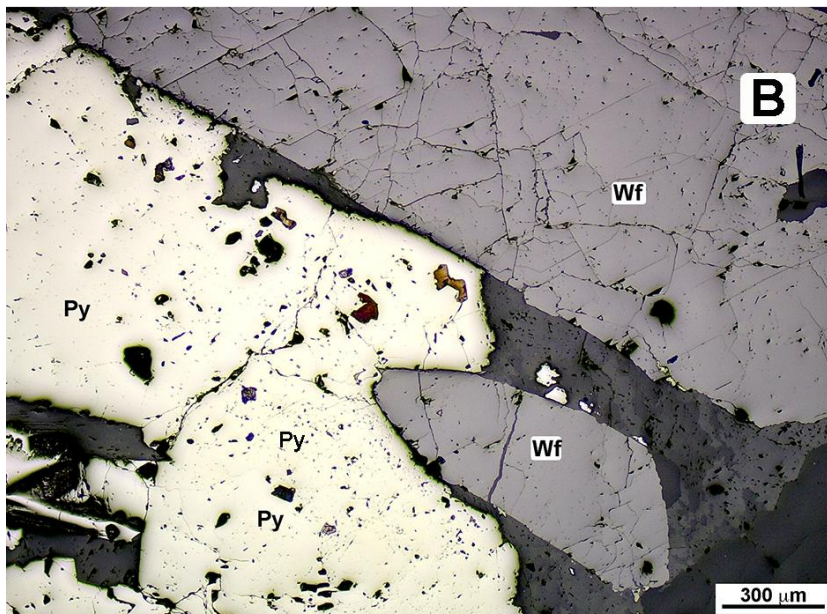
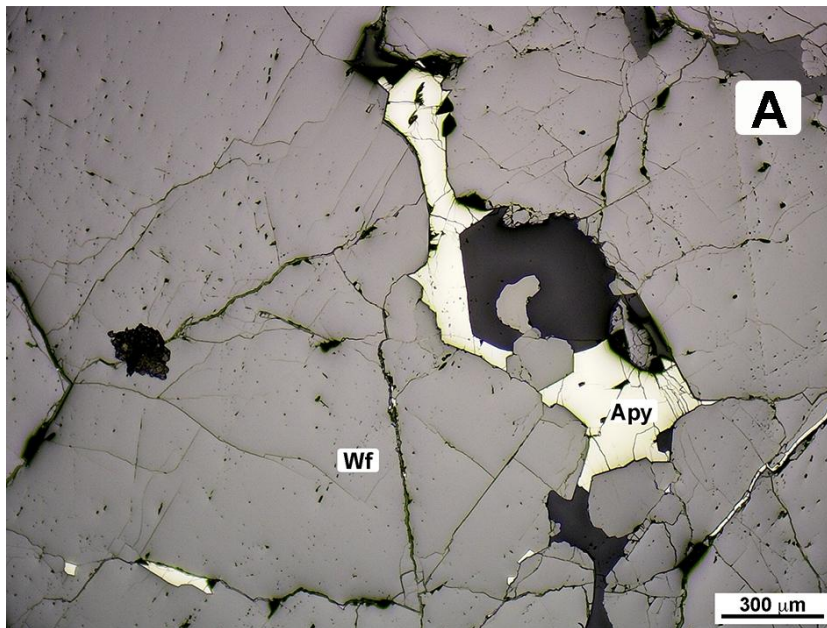


C: Magnetita (Mag) con procesos de exsolución en su interior de pequeños cristales de espinela (marcados con flechas). Se observan diferentes tonalidades en la magnetita debido al proceso de alteración a hematites (martitización).

D: Imagen anterior, con dos polarizadores. Se puede observar el proceso de martitización, que progresa principalmente por las fracturas y bordes de grano (flecha) y que da efecto de anisotropía a la magnetita (Mag).

Yacimientos tipo greisen (W-Sn). Panasqueira (Portugal) y Mina Teba (Badajoz, España)

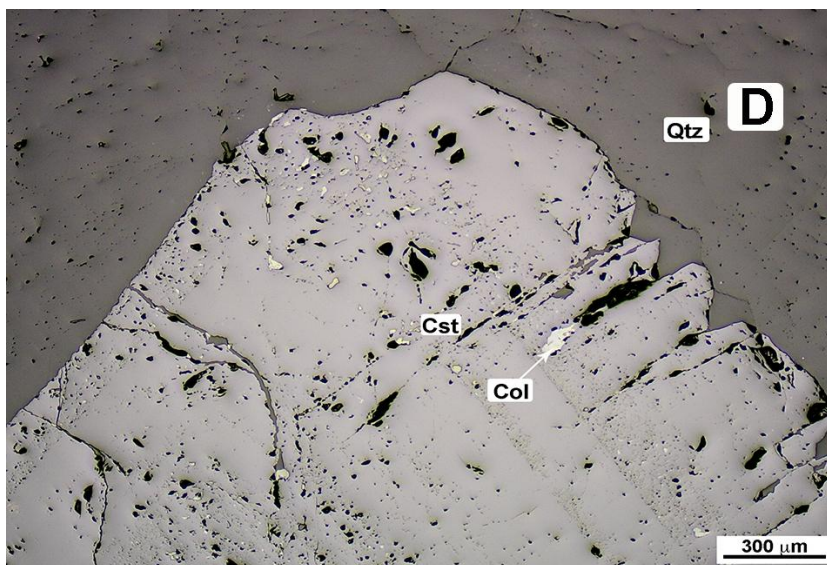
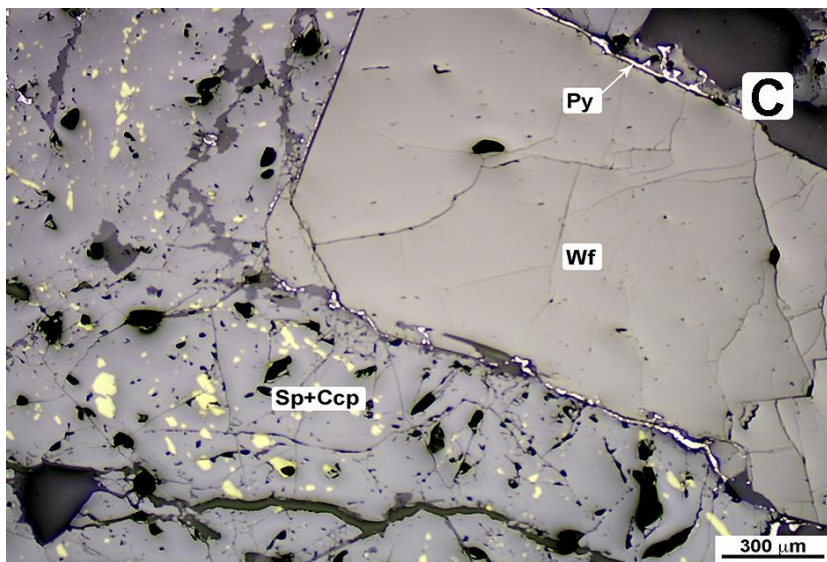




Los yacimientos de tipo greisen se encuentran asociados a cúpulas graníticas. Wolframio, estaño, niobio o tántalo son metales recuperados en este tipo de yacimientos. El más conocido en Europa es el de Panasqueira explotado para la obtención de wolframita.

A: En Panasqueira el mineral principal es la wolframita (Wf), formada en los primeros estadios de mineralización; puede estar acompañada por arsenopirita (Apy) como mineral accesorio.

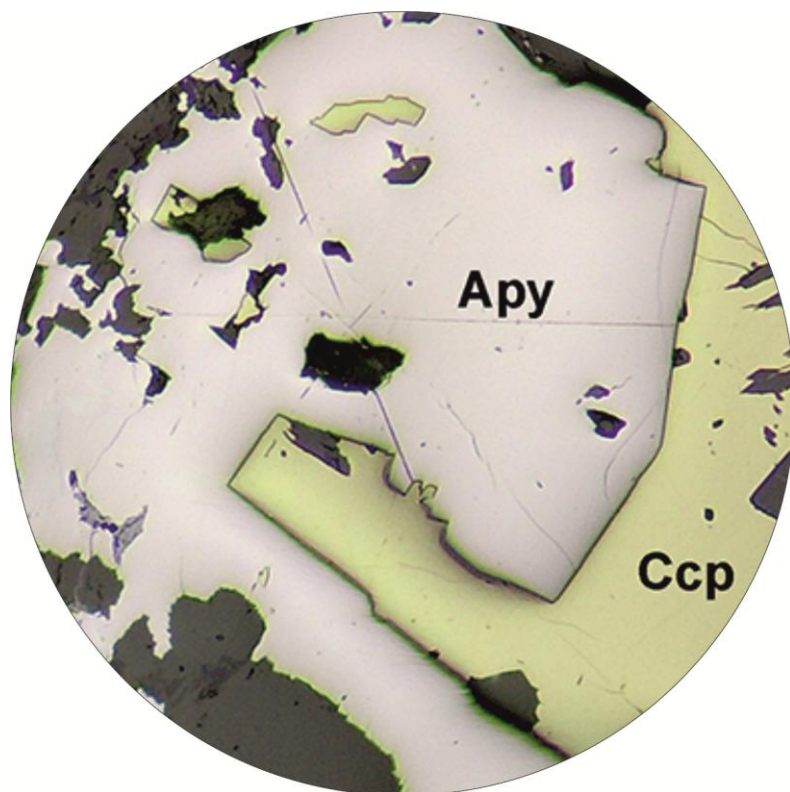
B: La wolframita (Wf) presenta morfología masiva, o se presenta en cristales prismáticos. Otro de los sulfuros que acompañan a la wolframita como accesorios es la pirita (Py).

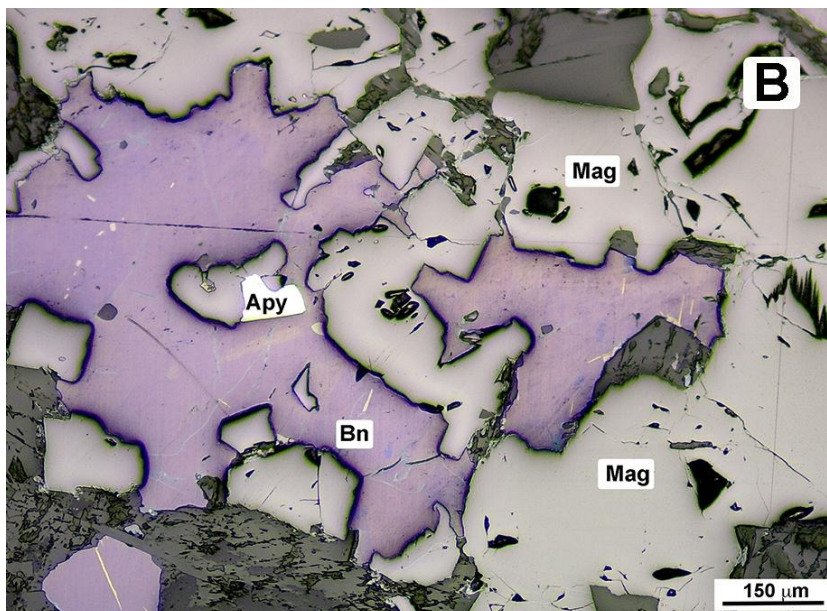
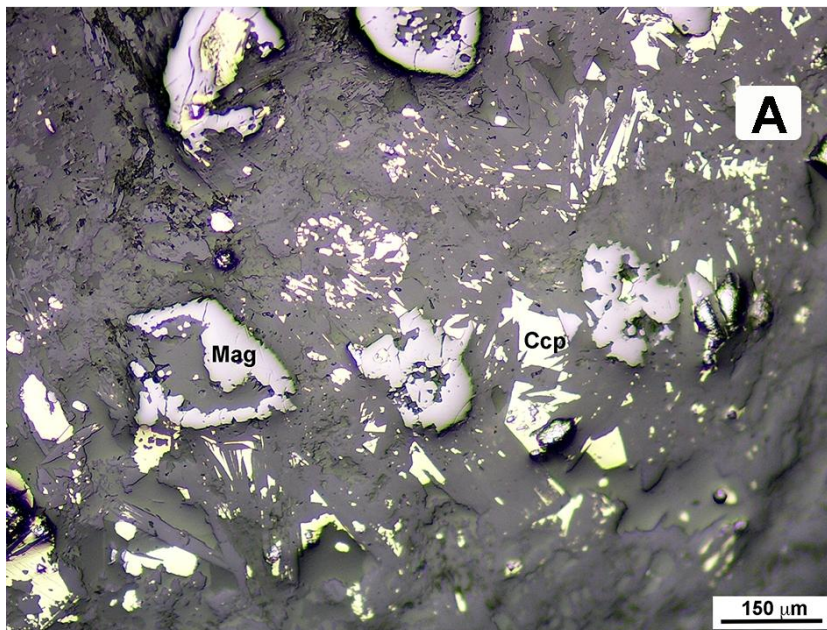


C: En Panasqueira hay un segundo estadio de mineralización compuesto por sulfuros de Fe-Cu-Zn. En la imagen se puede observar la wolframita (Wf) formada en los primeros estadios, rodeada por una fina capa de pirita (Py) y una posterior precipitación de esfalerita (Sp). Esta esfalerita contiene numerosas inclusiones de calcopirita (Ccp), conocidas con el término *disease*. Lógicamente estas inclusiones de calcopirita dificultan la separación metalúrgica de la esfalerita.

D: En las mineralizaciones de estaño de tipo greisen, el mineral principal suele ser la casiterita (Cst). Esta muestra de Mina Teba (Badajoz, España) contiene pequeñas inclusiones de columbita-tantalita, conocida también como *coltan* (Col). La ganga mas frecuente es el cuarzo (Qtz).

Skarn de Au-Cu. Carlés (Asturias, España) (1)

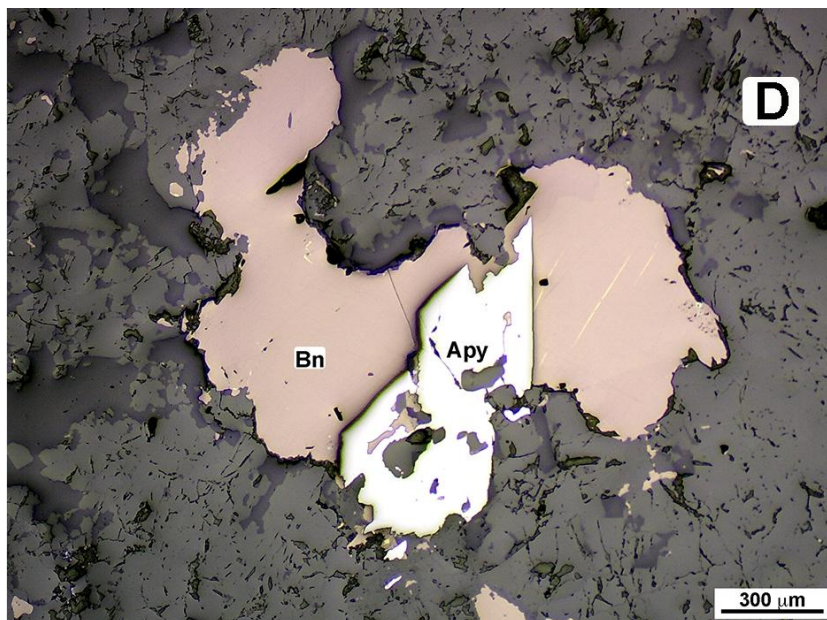
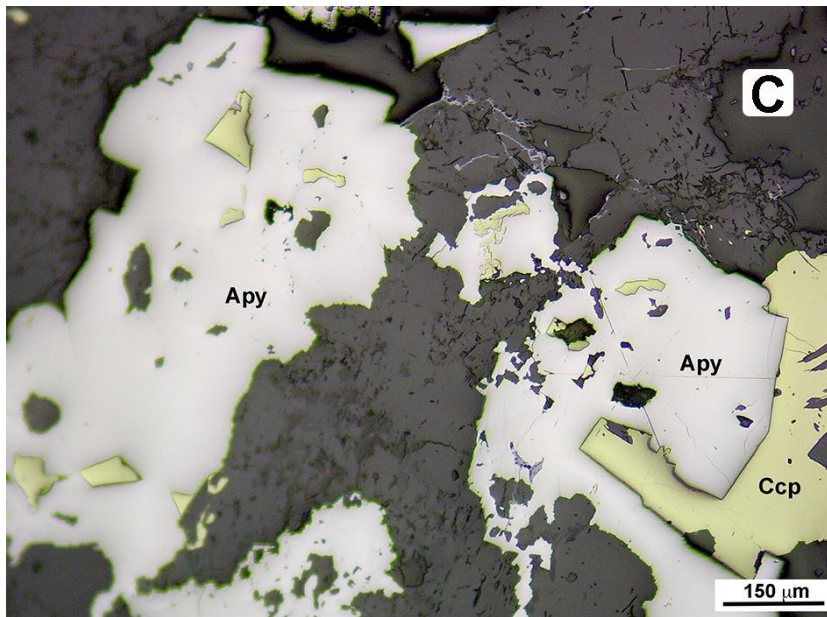




Los yacimientos de tipo skarn pueden ser muy variados en su contenido en metales. Los de Fe-Cu (Au), como el de Carlés y El Valle-Boinás en Asturias, presentan una mineralogía variada. En los primeros estadios suelen precipitar óxidos como magnetita, con algunos sulfuros como arsenopirita o pirita; en la fase retrógrada precipitan la mayoría de los minerales de cobre, calcopirita o bornita que varían su presencia y proporción en diferentes zonas del skarn.

A: Primeros estadios de mineralización. La magnetita (Mag) es uno de los minerales principales en la fase progrado del skarn. Se pueden observar texturas de corrosión en cristales idiomorfos. Junto a la magnetita hay también calcopirita (Ccp), que pertenecería a fases posteriores de mineralización mas ricas en cobre.

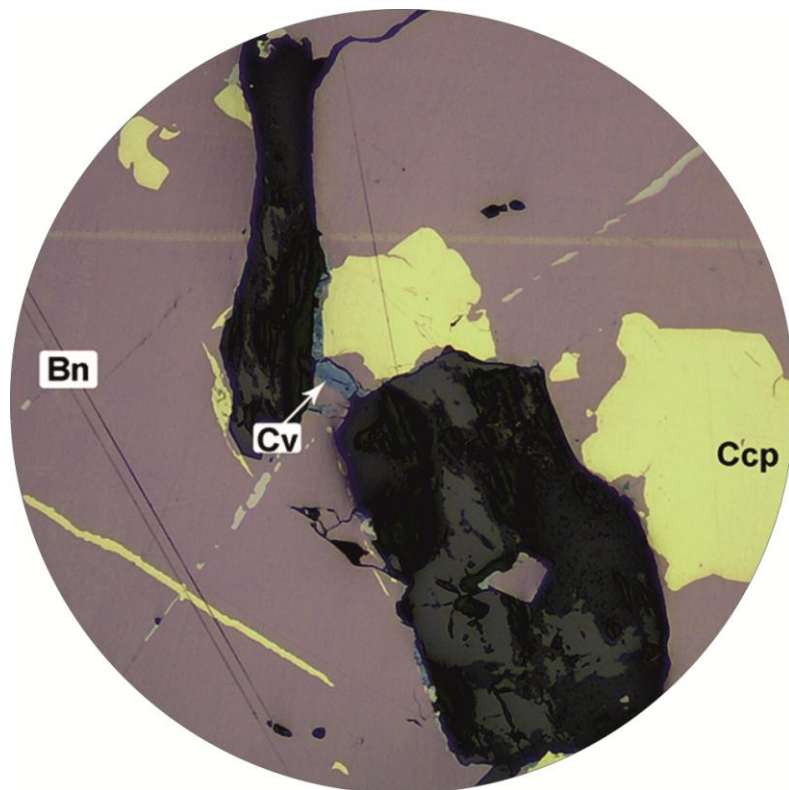
B: Magnetita (Mag) masiva y subidiomorfa, con un pequeño cristal de arsenopirita (Apy) asociado. En este caso la bornita (Bn) es el mineral mas tardío, que rellena huecos.

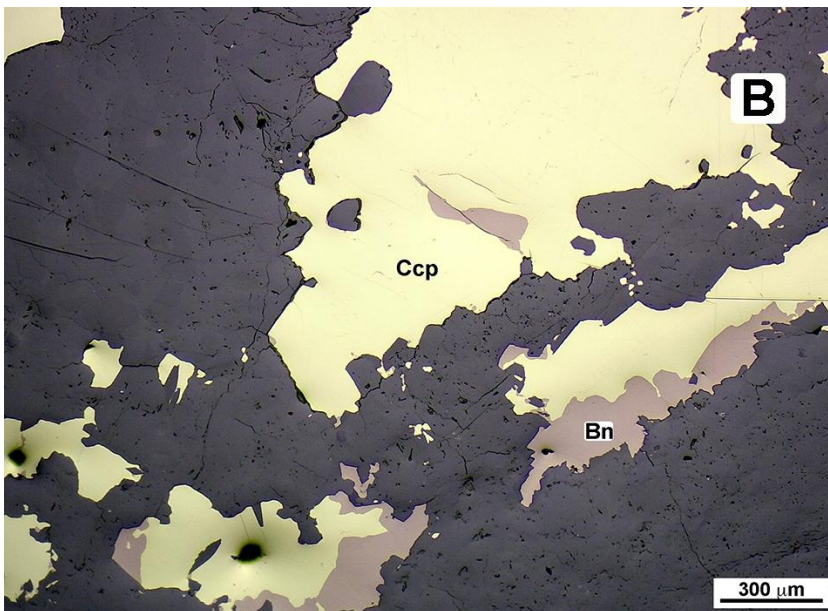
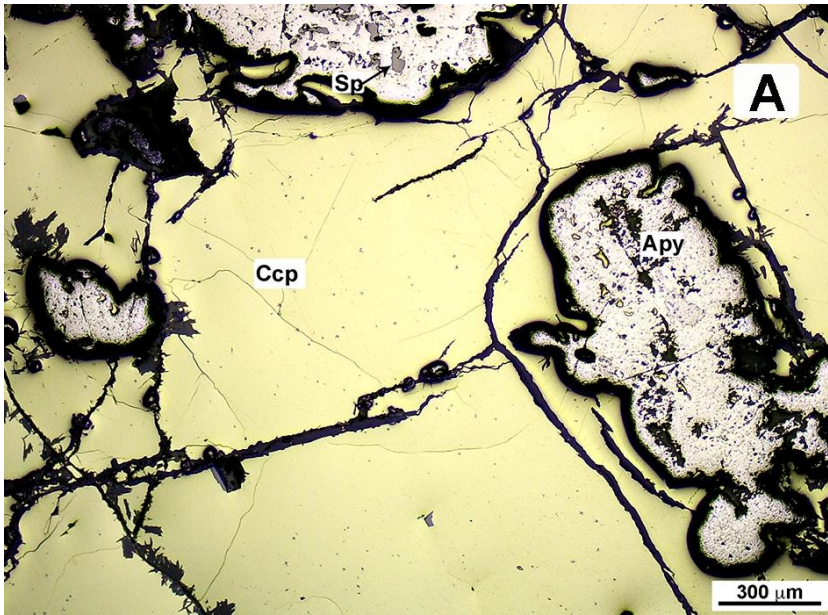


C: Arsenopirita (Apy) subidiomorfa, formada en las fases progrado. La calcopirita (Ccp) de fases retrógradas, rellena huecos y fracturas.

D: Otra muestra de la coexistencia de diferentes fases de mineralización. Cristal de arsenopirita (Apy) rodeado de bornita (Bn).

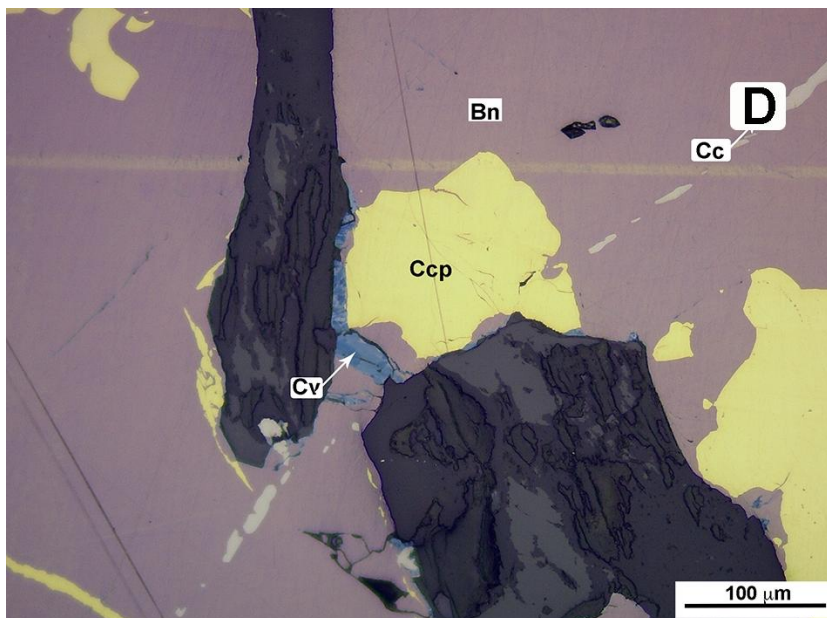
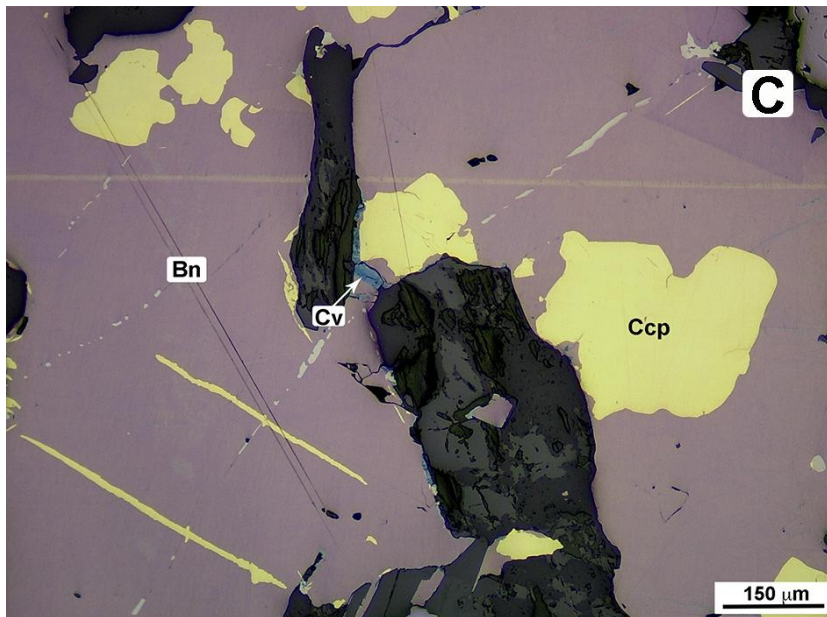
Skarn de Au-Cu. Carlés (Asturias, España) (2)





A: Cristales subidiomorfos de arsenopirita (Apy), con inclusiones de esfalerita (Sp) rodeados de calcopirita masiva (Ccp).

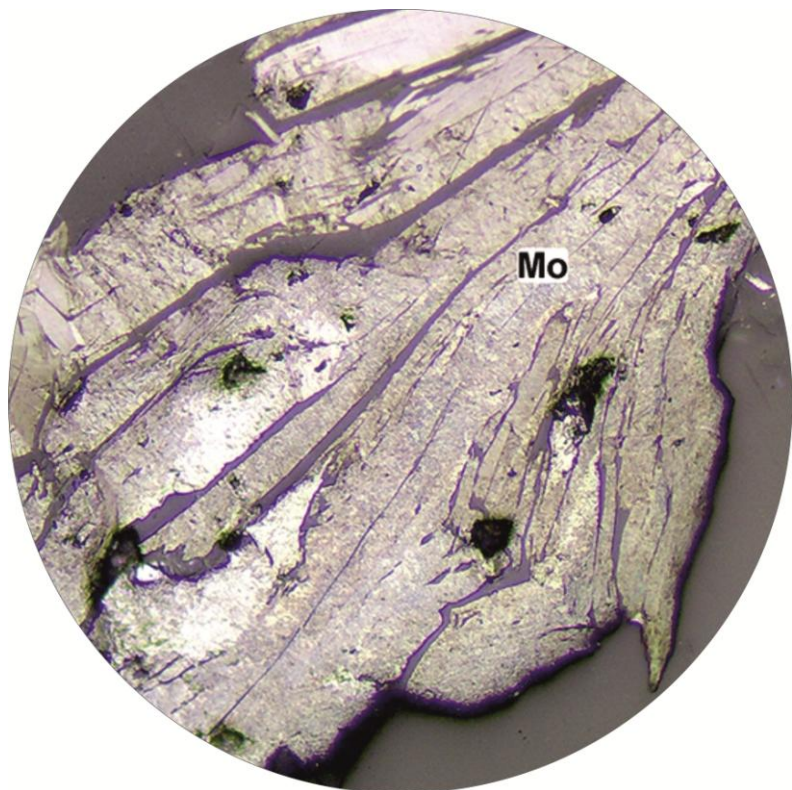
B: Las zonas del skarn mas ricas en cobre se caracterizan por la presencia variada de calcopirita (Ccp) asociada con bornita (Bn) en proporciones diferentes. En esta imagen predomina la calcopirita con respecto a la bornita.

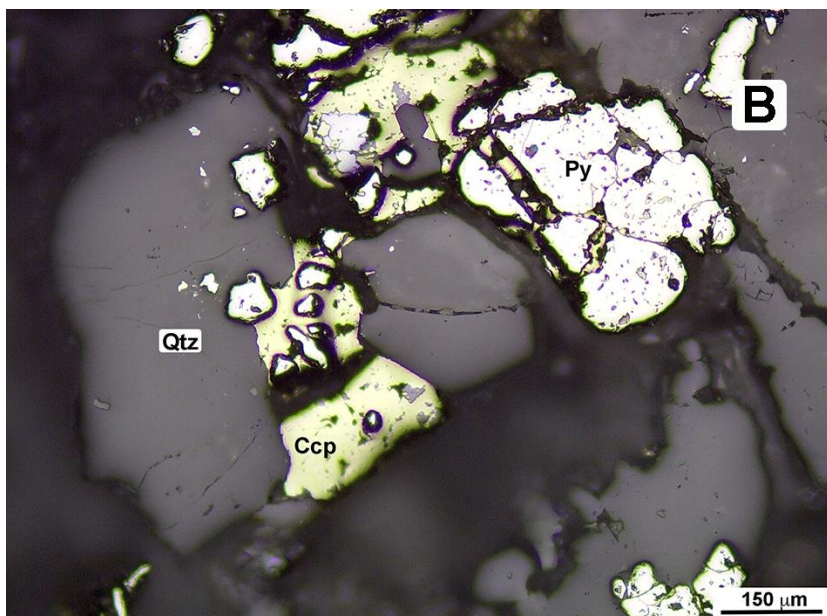
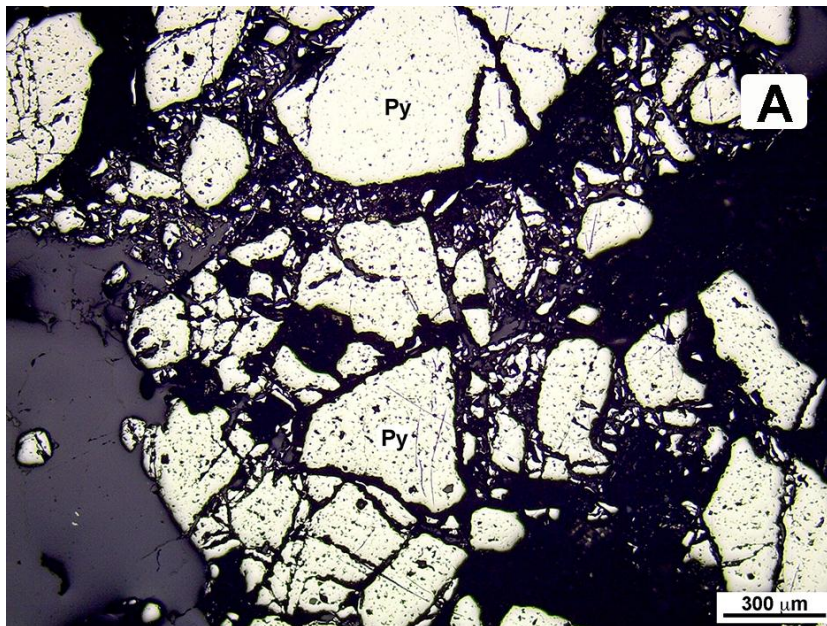


C: En este caso el mineral predominante es la bornita (Bn) sobre la calcopirita (Ccp). Se pueden observar lamelas de exsolución de calcopirita en bornita, consecuencia de la evolución de la temperatura y composición de los fluidos mineralizadores.

D: Detalle de la imagen anterior. Se puede observar la formación de sulfuros secundarios de cobre como calcosina (Cc) en zonas de fisuras, o covellina (Cv) en este caso en un borde de grano.

Yacimientos de tipo pórfido Cu - (Mo). Chuquicamata y Andacollo (Chile)

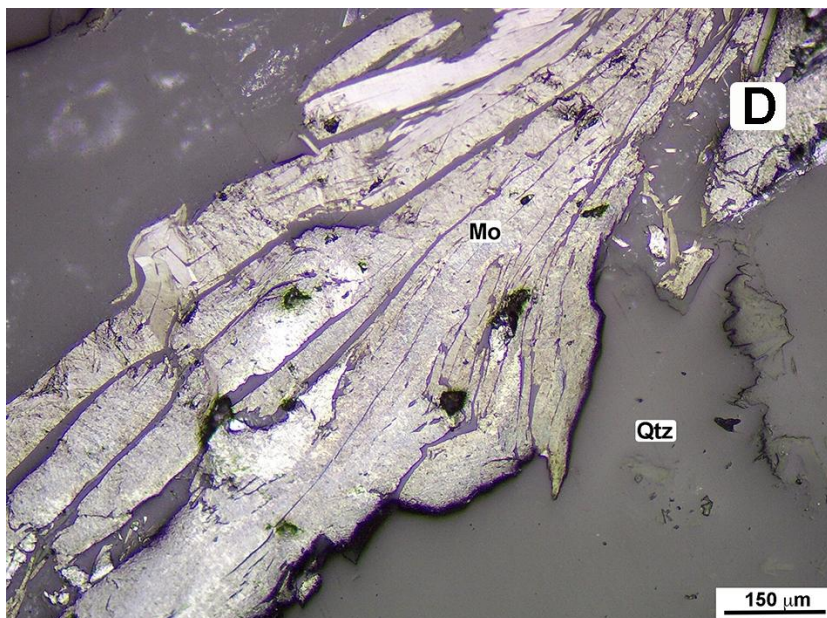
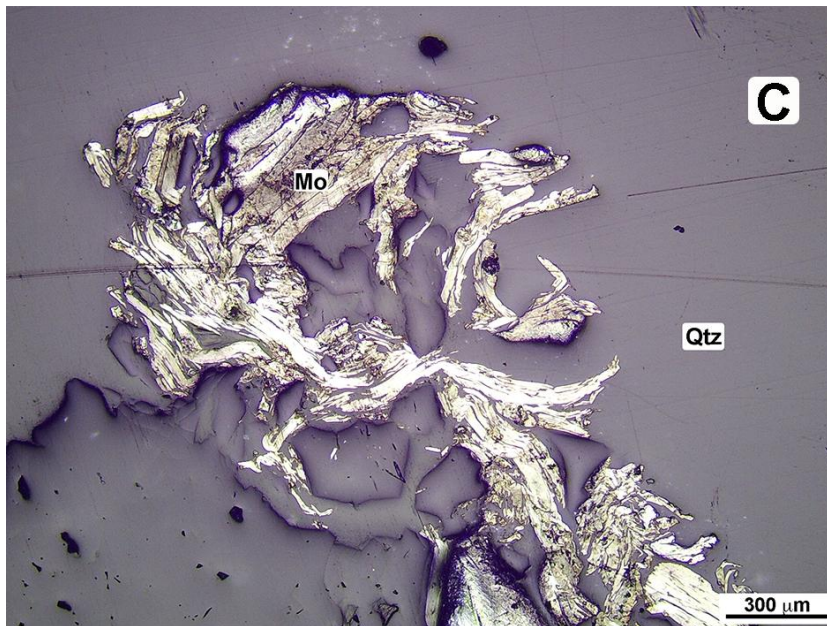




Los yacimientos de tipo pórfido, se caracterizan por mineralizaciones diseminadas y/o en stockwork en las que la pirita es el mineral predominante, junto con los minerales de cobre como calcopirita. En muchos casos los procesos de enriquecimiento supergénico originan mineralizaciones secundarias que elevan la ley media de los yacimientos, haciéndoles explotables.

A: Pórfido de Chuquicamata (Chile). Mineralización en zona con pirita (Py) brechificada. Se puede observar la fracturación de los granos

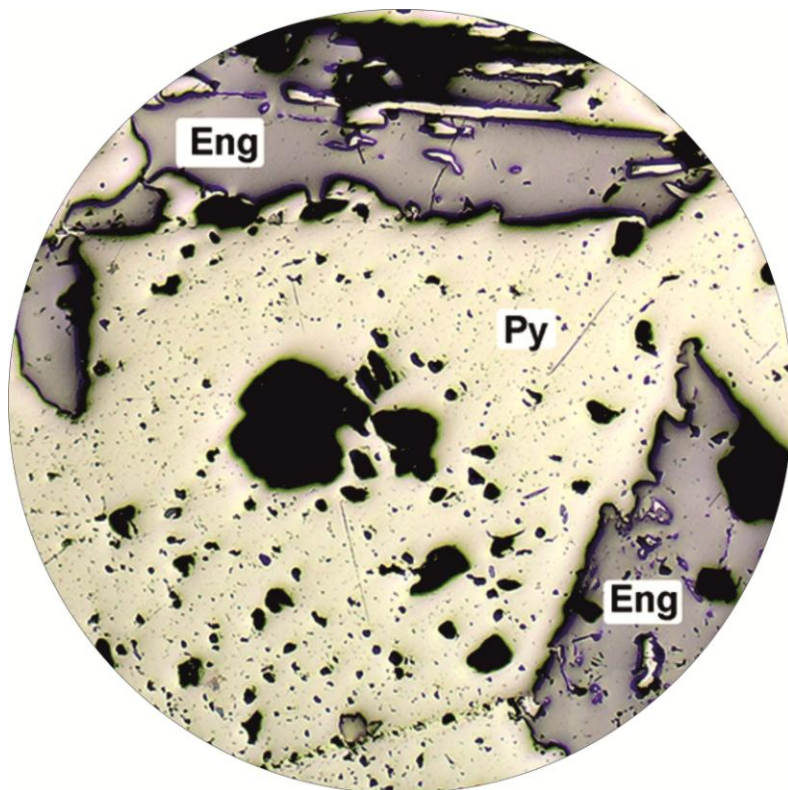
B: Zona de mineralización de calcopirita (Ccp) y pirita (Py). La calcopirita aparece en los bordes de pirita y rellenando huecos. La ganga acompañante es cuarzo (Qtz).

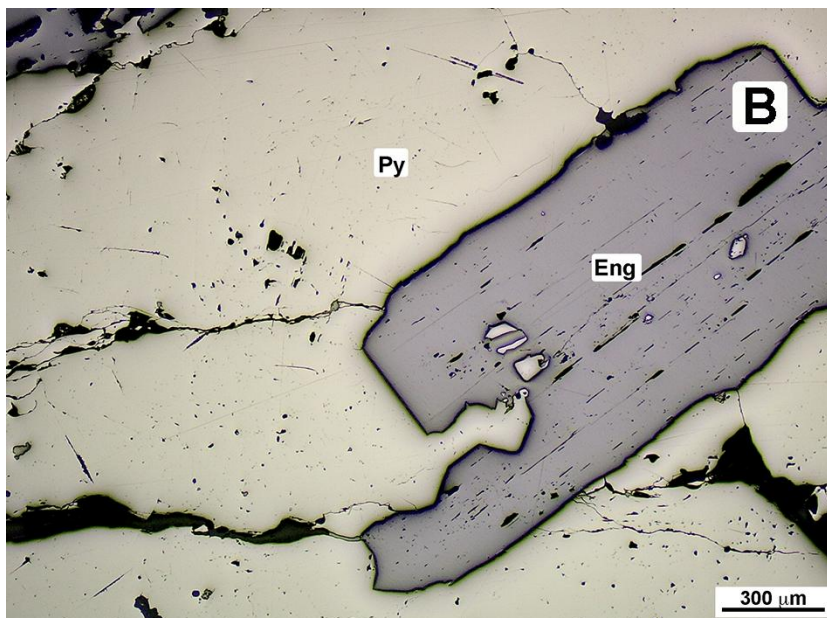
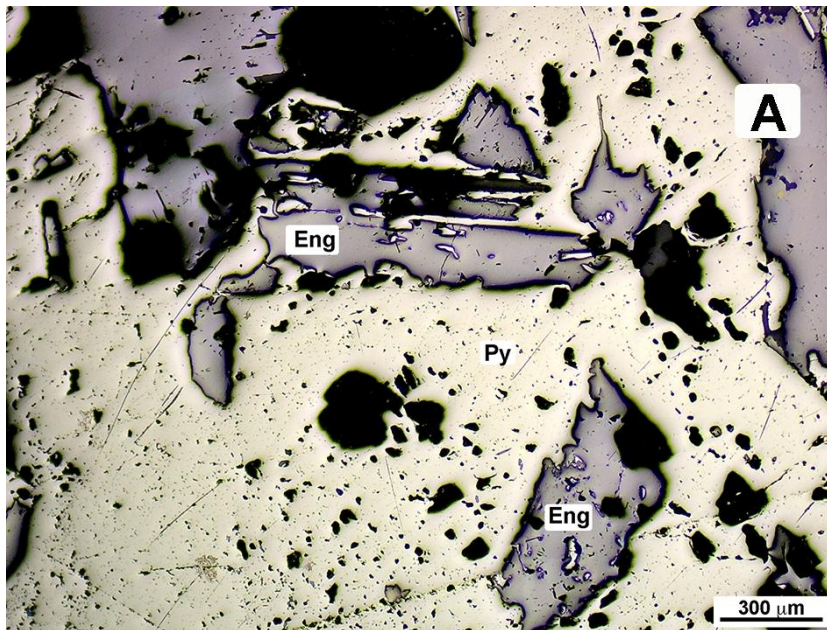


C: Pórfido de Mina Carmen (Andacollo, Chile). Los pórfidos de cobre de tipo andino suelen tener cantidades interesantes de molibdeno. En este caso se encuentra molibdenita (Mo) en zonas de pequeños filones y venillas de cuarzo (Qtz). La plasticidad de los cristales de molibdenita le dan este aspecto hojoso característico.

D: Otro ejemplo de la mineralización con molibdenita (Mo) en Mina Carmen. Se puede observar el color diferente de los cristales, según su orientación, debido a la fuerte birreflexión de este mineral.

Yacimientos epitermales de alta sulfuración. El Indio (Chile)

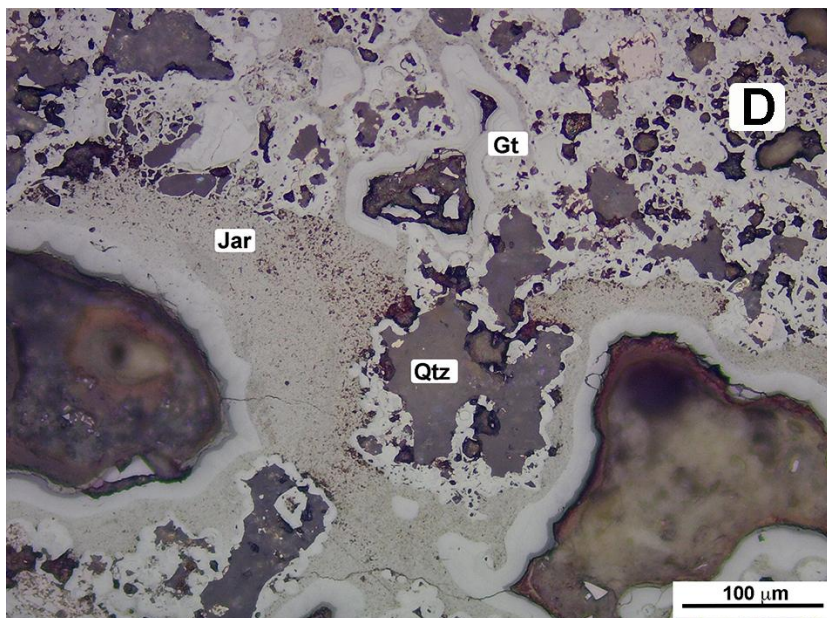
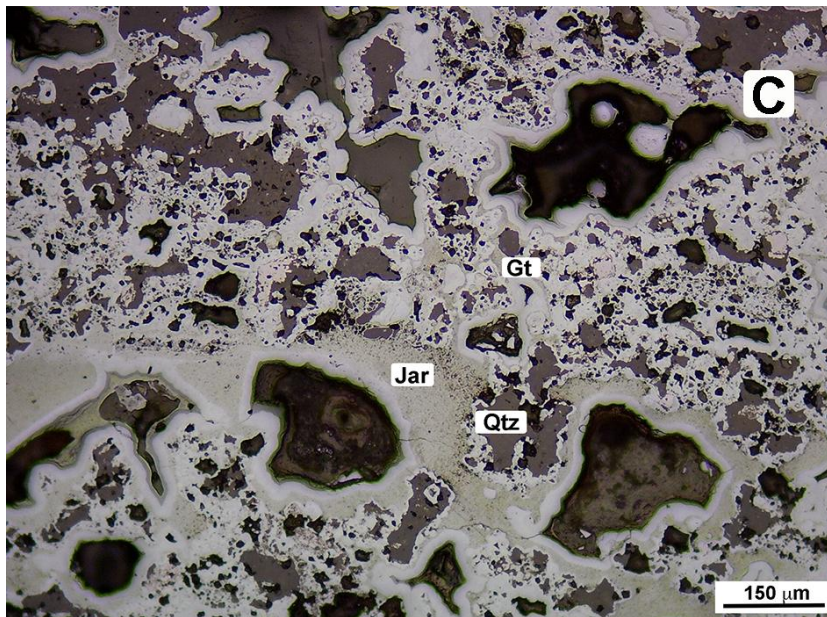




Los yacimientos epitermales de alta sulfuración se caracterizan por la presencia de tres minerales principales: enargita, sulfosal de cobre (Cu_3AsS_4), tennantita-tetraedrita (serie isomorfa) ($\text{Cu}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe},\text{Zn})_2]\text{As}_4\text{S}_{13}$ - $\text{Cu}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe},\text{Zn})_2]\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), y pirita. Estos yacimientos de alta sulfuración pueden estar conectados en profundidad con los sistemas de tipo pórfido.

A: Mineralización de El Indio (Chile). En las fases tempranas se forman enargita y pirita. En la imagen se pueden observar cristales de enargita (Eng) rodeados de pirita masiva (Py).

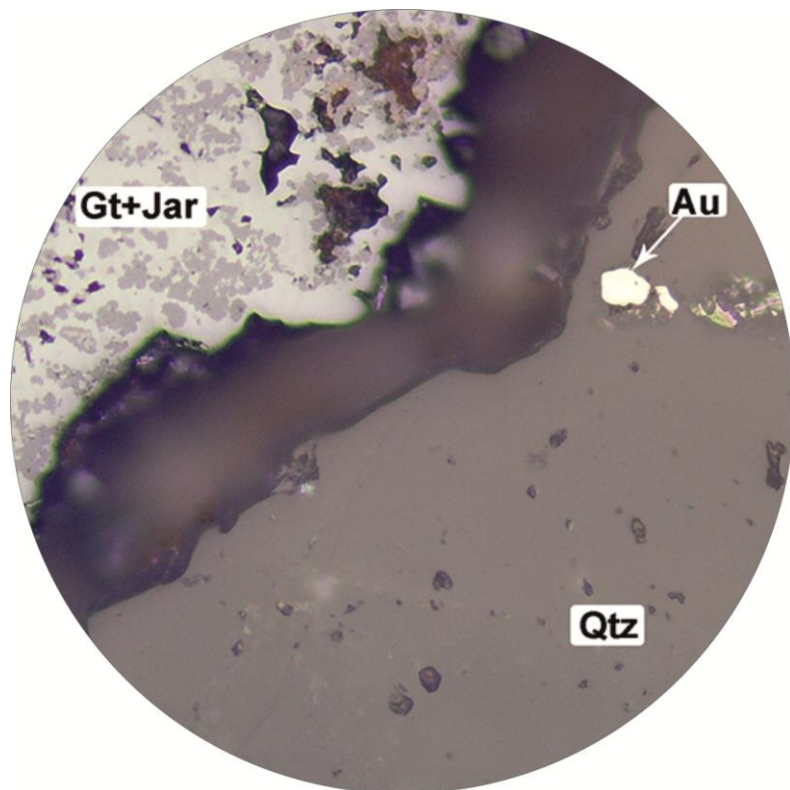
B: Otro ejemplo de la mineralización de enargita (Eng) y pirita (Py). Las texturas indicarían que la pirita es ligeramente posterior a la enargita, ya que envuelven los cristales de ésta.

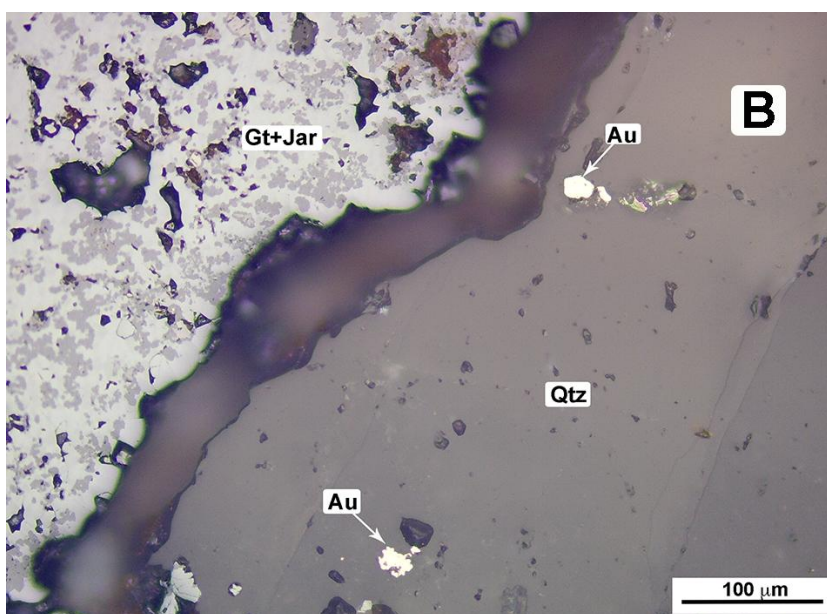
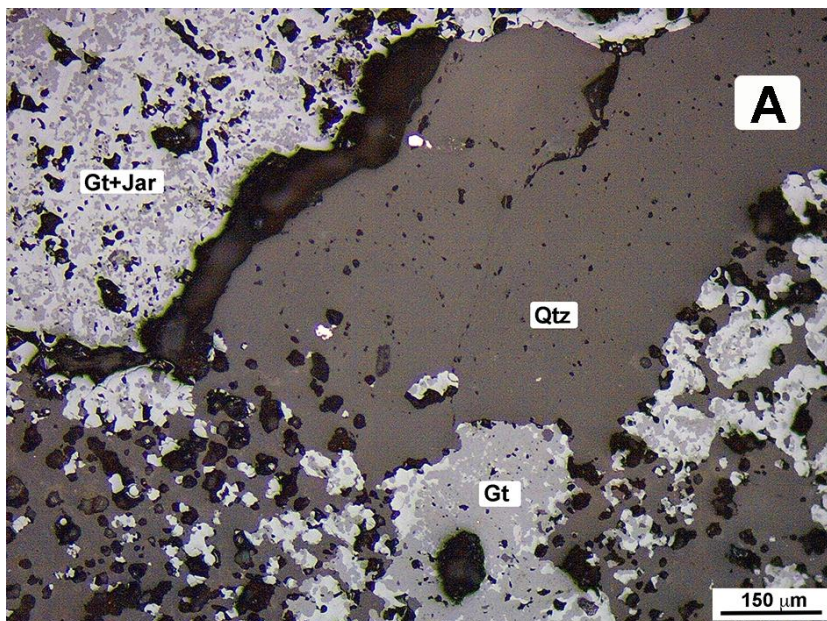


C: Las zonas someras de los yacimientos epitermales presentan alteración argílica avanzada, que afecta a toda la ganga silicatada. En estas zonas los minerales mas comunes son goethita (Gt), hematites, cuarzo (Qtz), y jarosita (Jar).

D: Detalle de la imagen anterior. Se observan mejor las oquedades de la muestra como consecuencia de la disolución de los sulfuros primarios, destacando la presencia de cuarzo (Qtz), goethita (Gt) y jarosita (Jar).

Yacimientos epitermales oxidados. Rodalquilar (Almería, España)

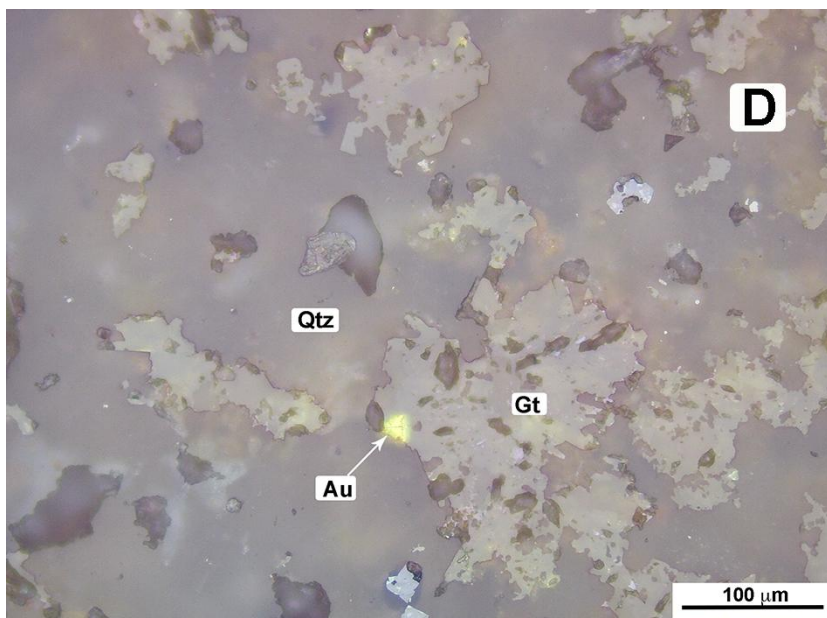
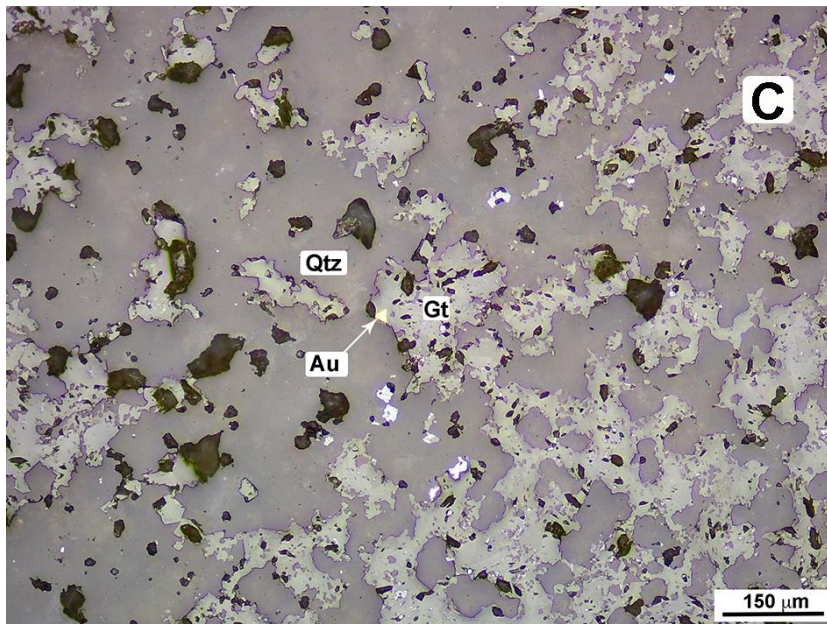




Rodalquilar (Almería, España) es un ejemplo de un yacimiento epitermal de alta sulfuración oxidado. La alteración hidrotermal y la supergénica están superpuestas, haciendo difícil reconocer en que etapa se han formado los minerales.

A: Mineralización oxidada en Rodalquilar, queda solamente cuarzo (Qtz) y goethita con jarosita (Gt+Jar). Se pueden reconocer pequeños cristales de oro nativo (Au), en este caso dentro de un grano de cuarzo.

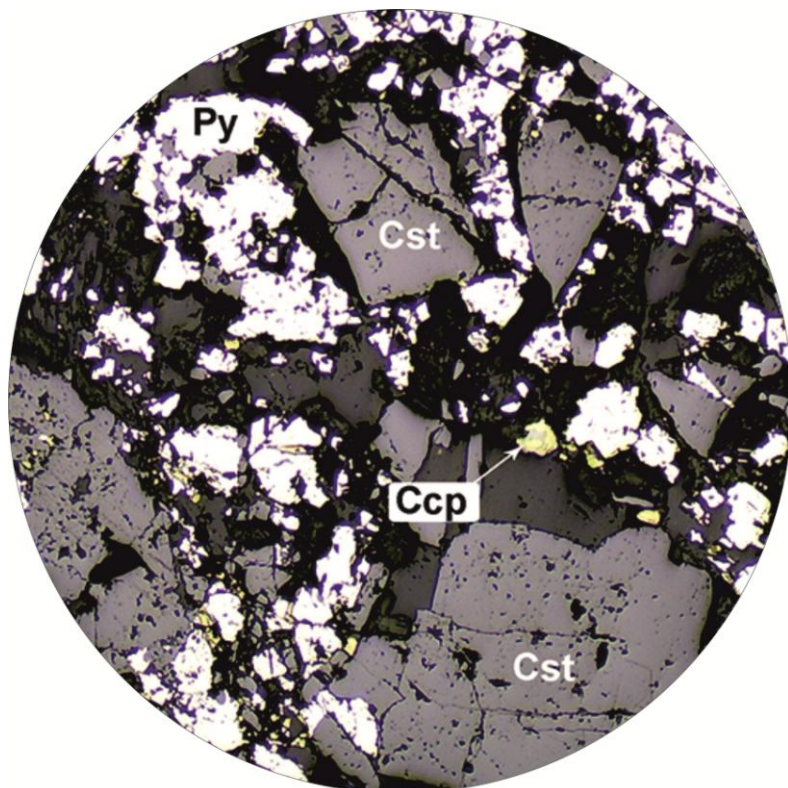
B: Detalle de la imagen anterior, Se observan mejor los intercrecimientos de las fases oxidadas (Gt+Jar) y los granos de oro (Au).

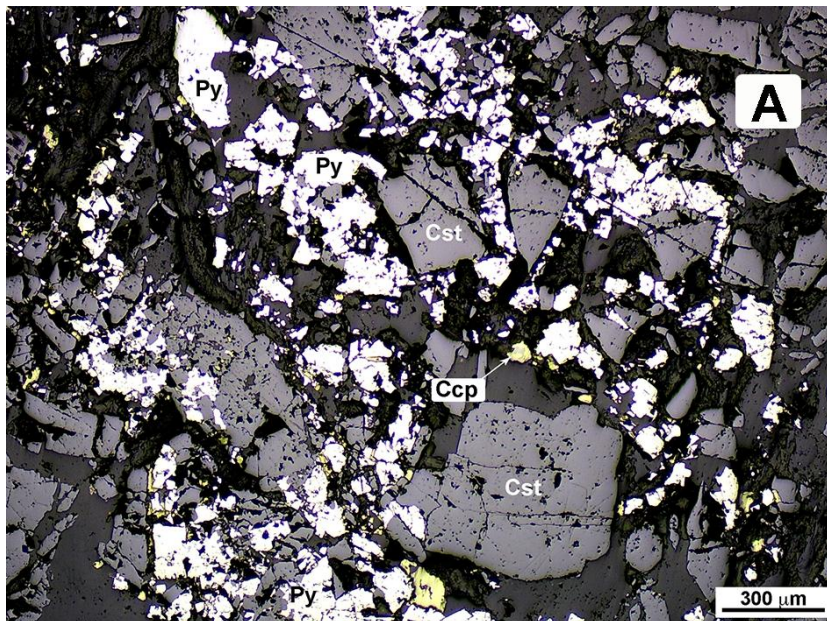


C: En este caso cuarzo (Qtz) y goethita (Gt) se encuentran fuertemente intercrecidos. También se puede reconocer un pequeño grano de oro nativo (Au) de apenas unas micras de tamaño.

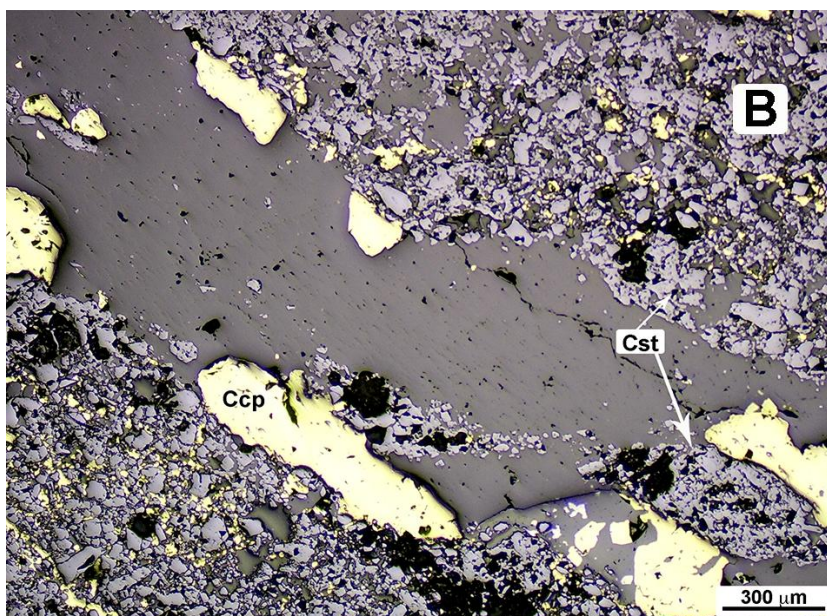
D. Detalle de la imagen anterior, donde se observa mejor el oro nativo y los intercrecimientos cuarzo-goethita.

Yacimientos tipo VHMS. Neves Corvo (Portugal) (1)



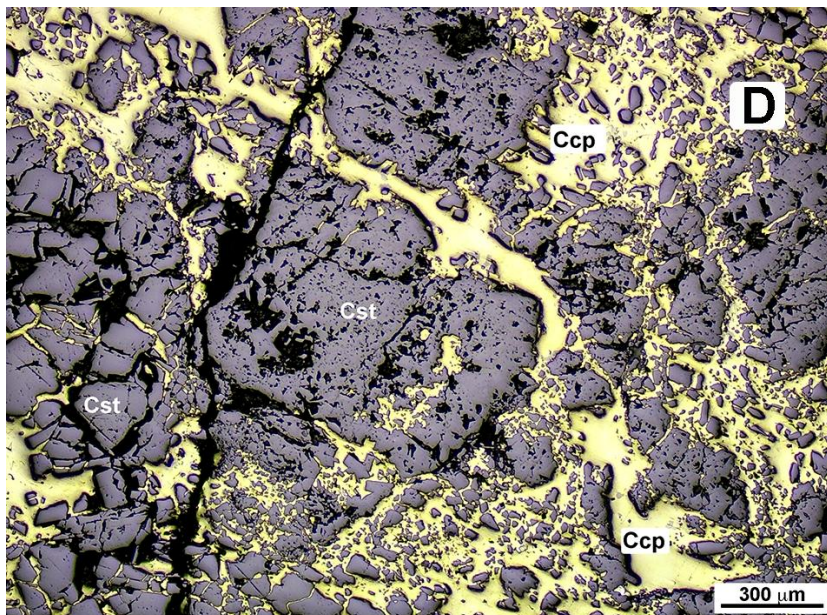
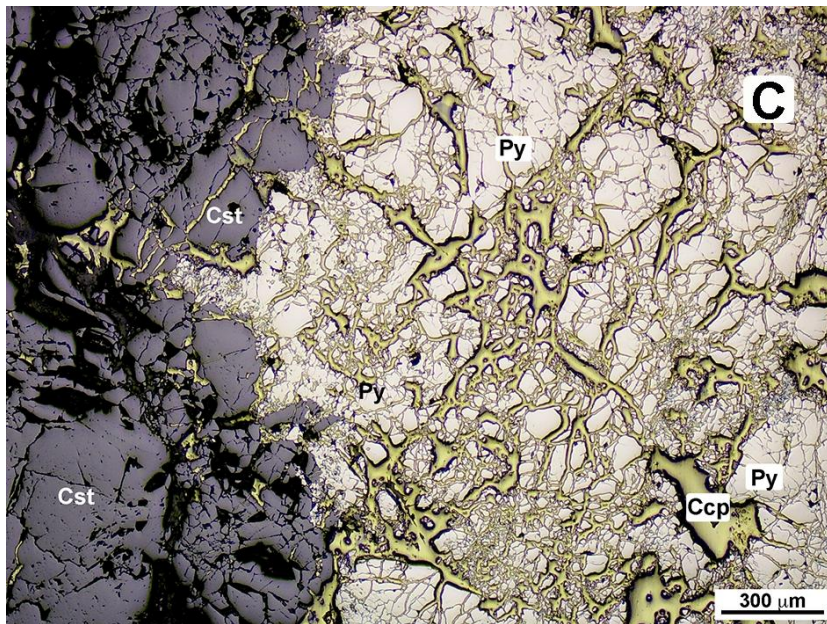


Dentro de los yacimientos vulcanosedimentarios de la Faja Piritica Ibérica, Neves Corvo constituye un ejemplo excepcional, principalmente por ser muy rico en estaño, lo que no ocurre normalmente en yacimientos de este tipo. Se pueden reconocer texturalmente varios estadios mineralizadores que originaron este yacimiento excepcional.



A: La casiterita (Cst) es el mineral principal de estaño, formado en los primeros estadios de la mineralización, rodeado por cantidades menores de pirita (Py) y calcopirita (Ccp).

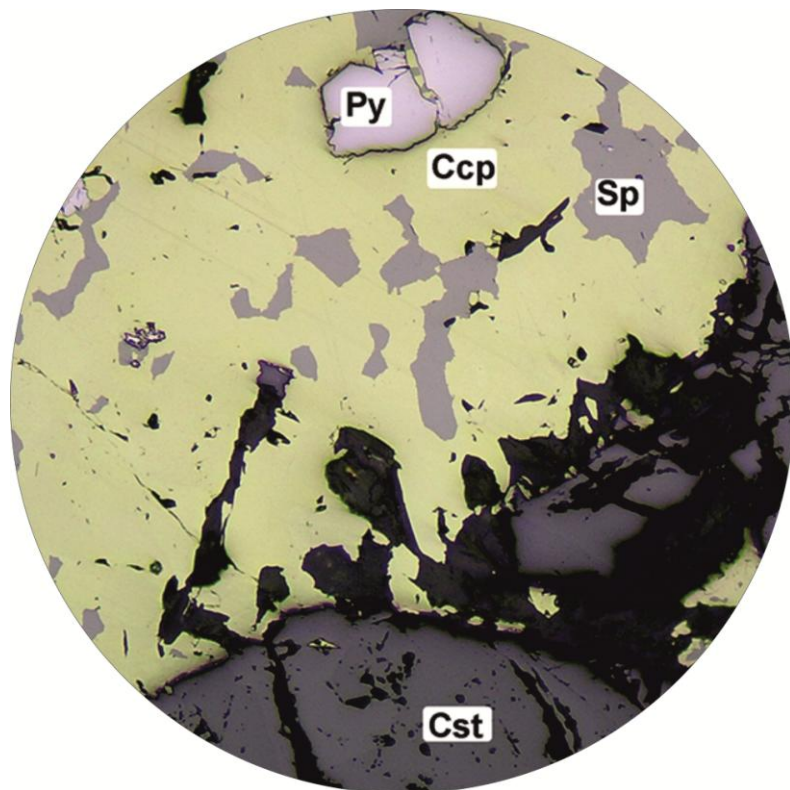
B: En este caso los cristales de casiterita (Cst) aparecen brechificados. Los minerales de la ganga (cuarzo o carbonatos) y calcopirita (Ccp) son posteriores a la brechificación.

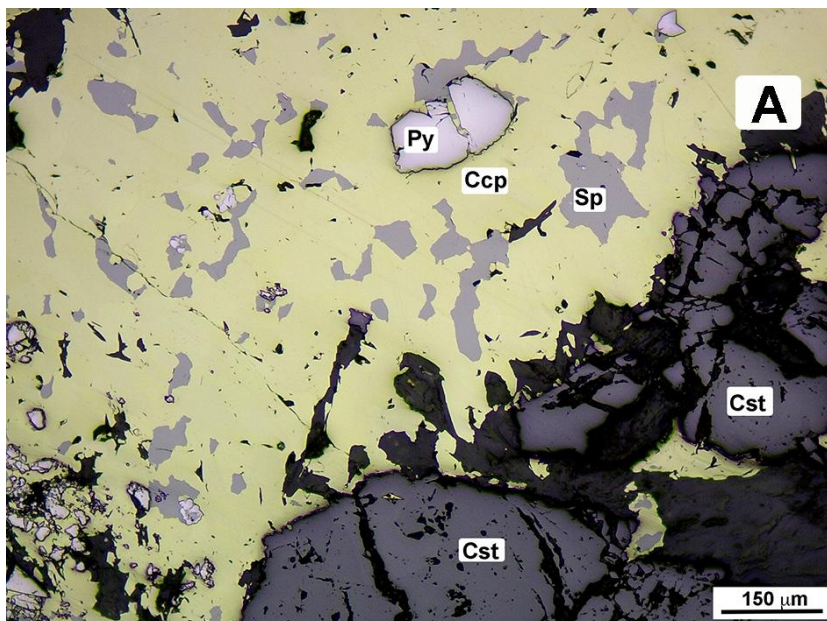


C: En la imagen se puede deducir la secuencia de la mineralización: casiterita (Cst), pirita (Py) y calcopirita relleno fisuras y huecos.

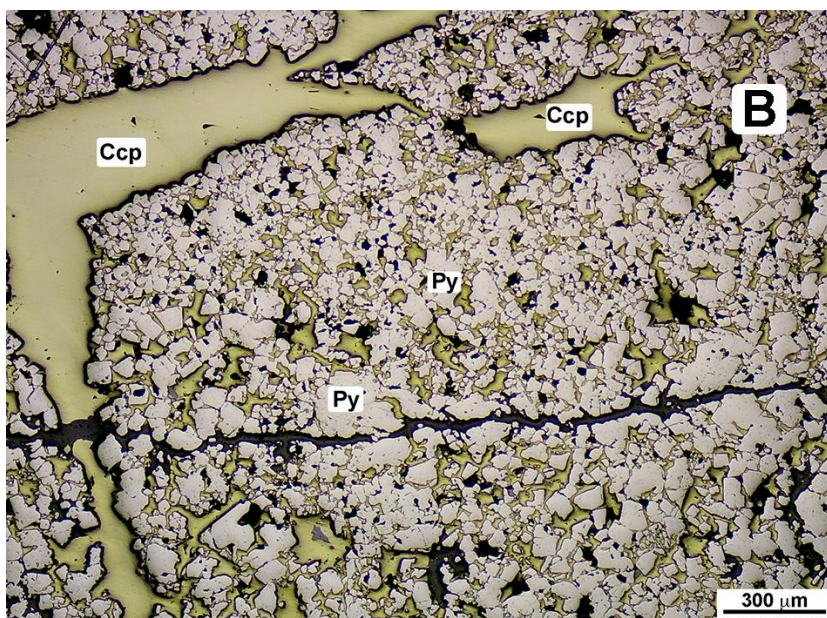
D: En la imagen se reconocen dos estadios de mineralización, primero casiterita (Cst) y posterior precipitación de calcopirita (Ccp).

Yacimientos tipo VHMS. Neves Corvo (Portugal) (2)



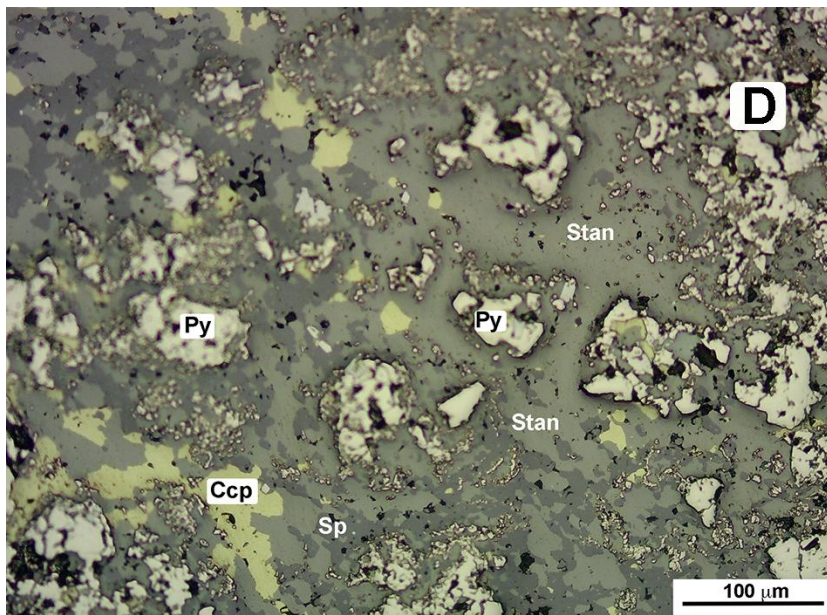
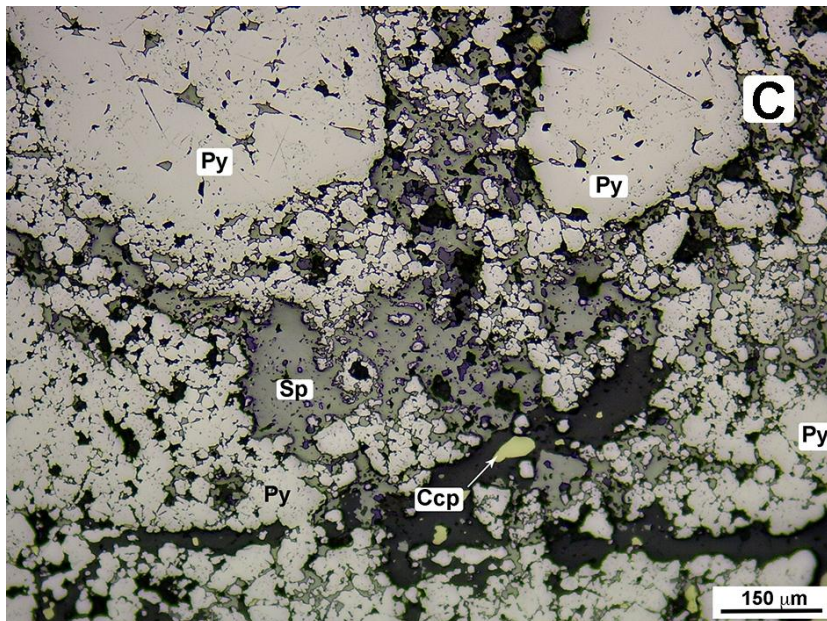


En el yacimiento de Neves Corvo, se reconocen al menos tres estadios de mineralización, (1) casiterita, (2) fase rica en cobre y una fase tardía (3) mas rica en zinc. Hay procesos de sustitución y reemplazo de unos minerales por otros.



A: En la imagen se puede observar casiterita (Cst), restos de cristales idiomorfos de pirita (Py) envueltos en calcopirita masiva (Ccp), y esfalerita (Sp). Calcopirita y esfalerita serían coetáneas, por los intercrecimientos que presentan.

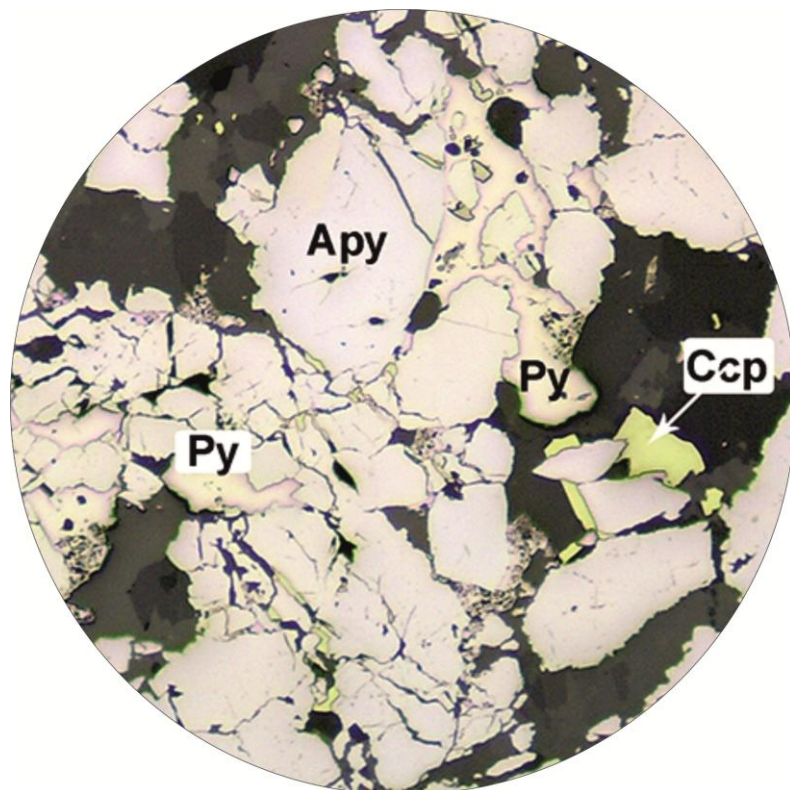
B: Pirita masiva (Py) con calcopirita (Ccp) posterior rellenando huecos. Las morfologías de la calcopirita, con granos con bordes cóncavos, indican que son posteriores a la pirita.

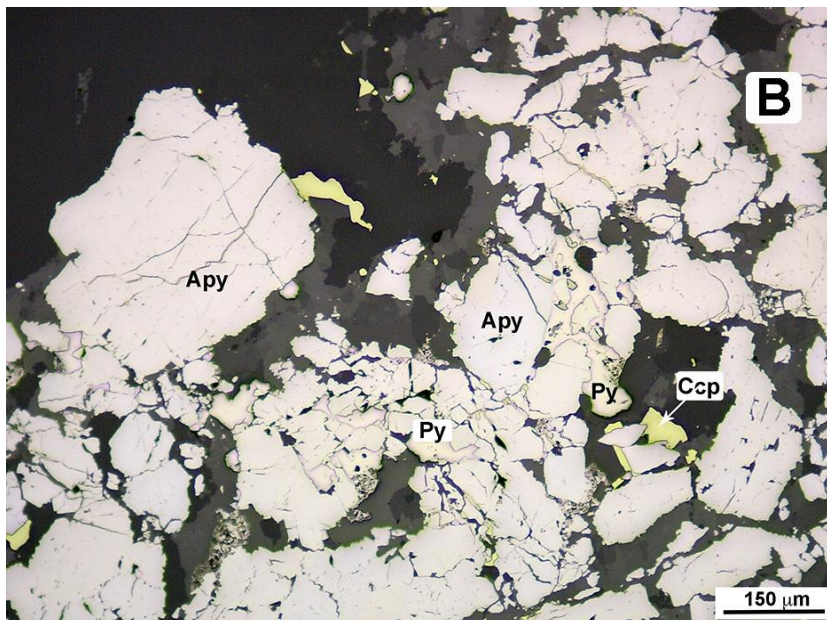
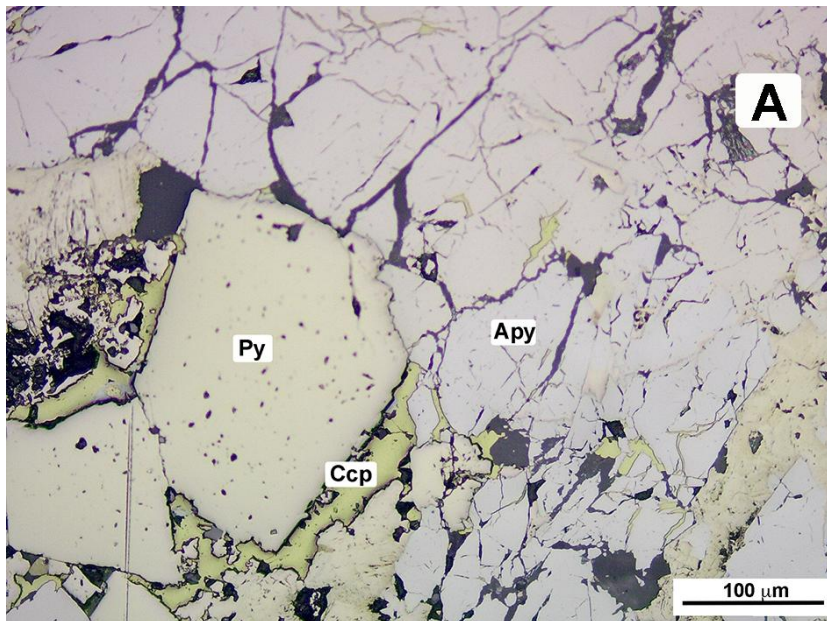


C: En esta imagen no se encuentran los minerales del estadio de casiterita. La pirita (Py), en cristales idiomorfos y masiva, se encuentra rodeada por esfalerita (Sp) y algún grano de calcopirita (Ccp).

D: En la imagen se pueden observar granos de pirita (Py) reemplazados por minerales de las fases mas tardías, algo de calcopirita (Ccp), estannita (Stan) y esfalerita (Sp), estos dos últimos son mayoritarios en la imagen.

Yacimientos mesotermales de Au. Salsigne (Francia)

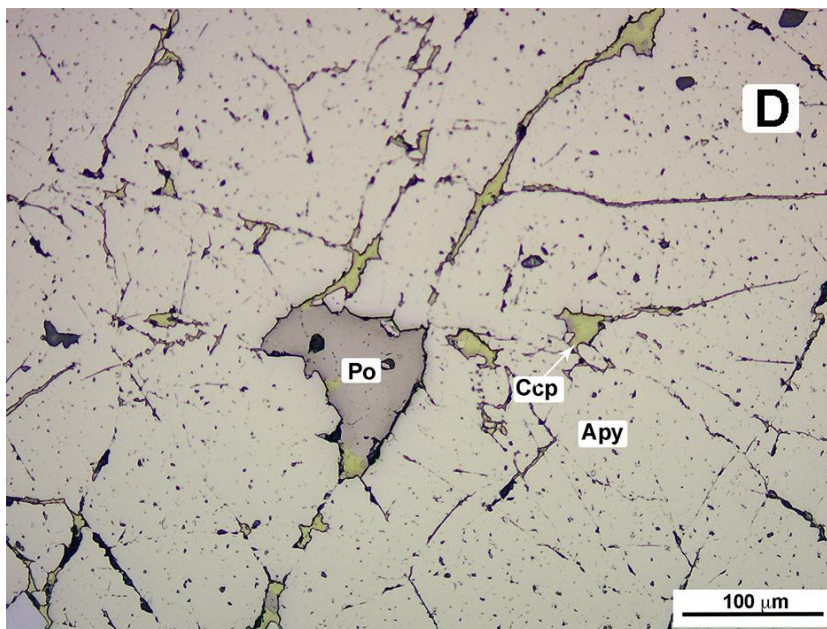
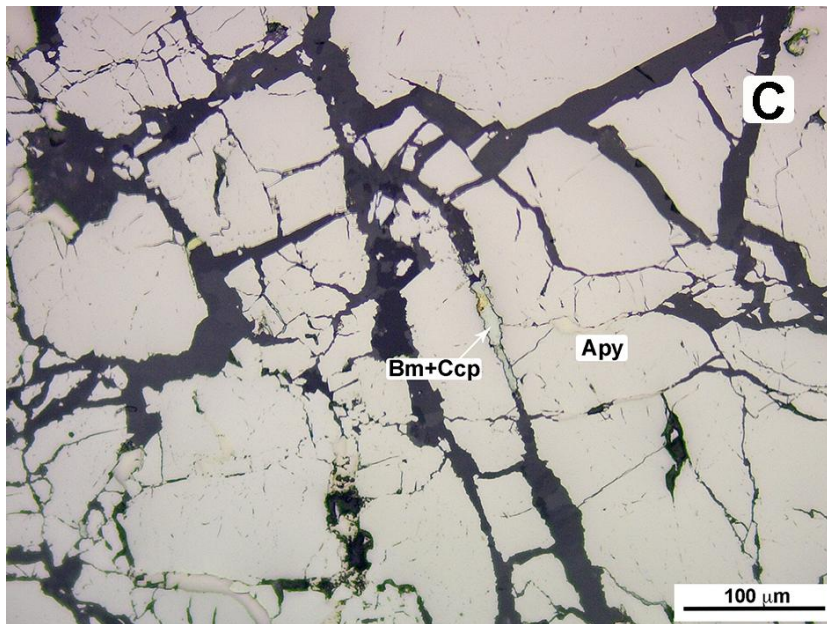




Los yacimientos mesotermales de oro en la cadena varisca (hercínica) europea, como Salsigne en Francia o Corcoesto en Galicia, se caracterizan por la presencia de arsenopirita y pirita como minerales principales. Otra característica de estos yacimientos es la presencia de varias fases de mineralización y brechificación, que facilitan el enriquecimiento final en oro de los yacimientos.

A: Yacimiento de Salsigne (Francia). Intercrecimientos de arsenopirita (Apy) y pirita (Py); se puede observar la diferencia de color (mas blanca la arsenopirita). Destaca también la fracturación de los granos de arsenopirita, producto de la brechificación. La pirita, menos fracturada, sería posterior a la arsenopirita. La calcopirita (Ccp), minoritaria, se forma en una fase mas tardía y rellena huecos y fracturas.

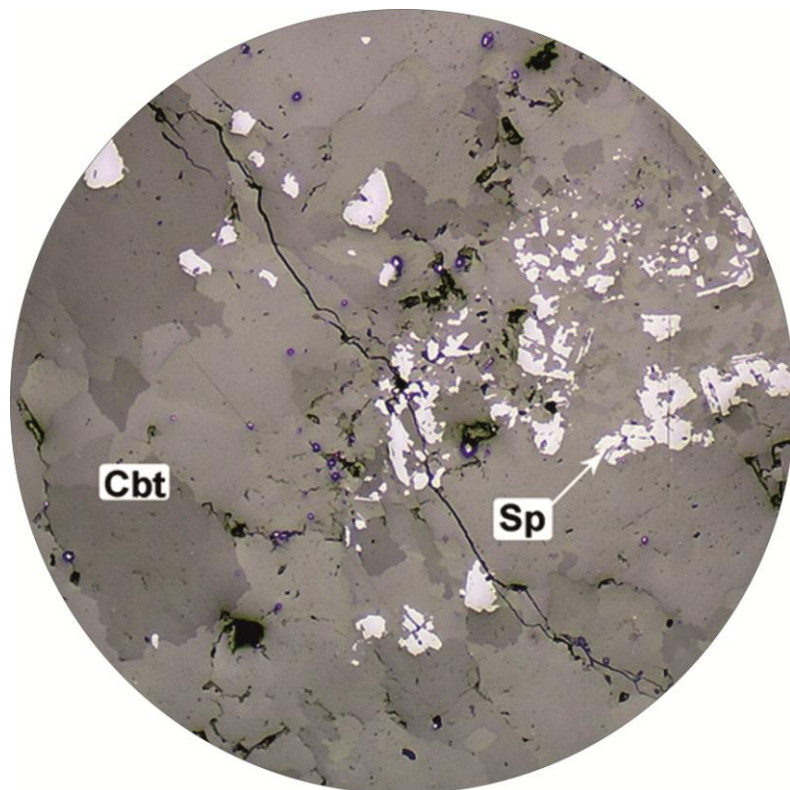
B: En la muestra se puede observar la secuencia de cristalización: arsenopirita (Apy) - pirita (Py) bordeando y envolviendo arsenopirita y calcopirita (Ccp) como fase mineral mas tardía.

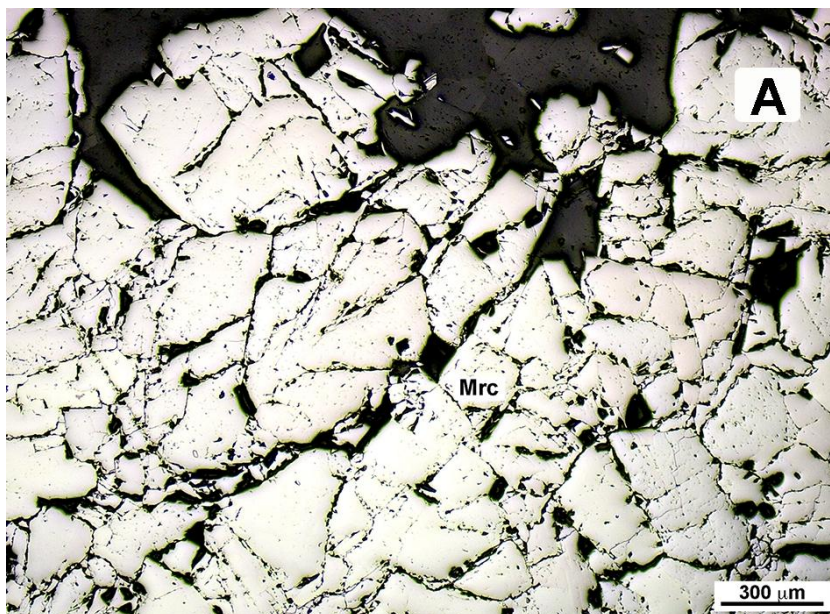


C: Las fases minerales tardías de calcopirita (Ccp) pueden ir acompañadas de bismuto nativo y/o bismutina (Bm) relleno las fracturas y huecos en arsenopirita (Apy).

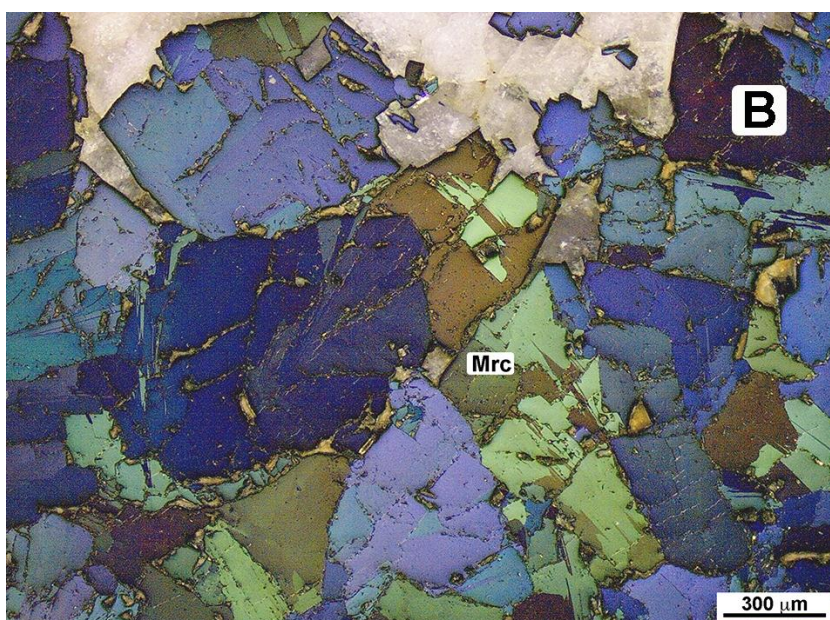
D: Otro sulfuro de hierro común en estas paragénesis es la pirrotina (Po), que también rellena huecos en la arsenopirita (Apy). Lo mismo hace la calcopirita (Ccp).

Yacimientos tipo Mississippi Valley. Reocín (Cantabria, España) (1)



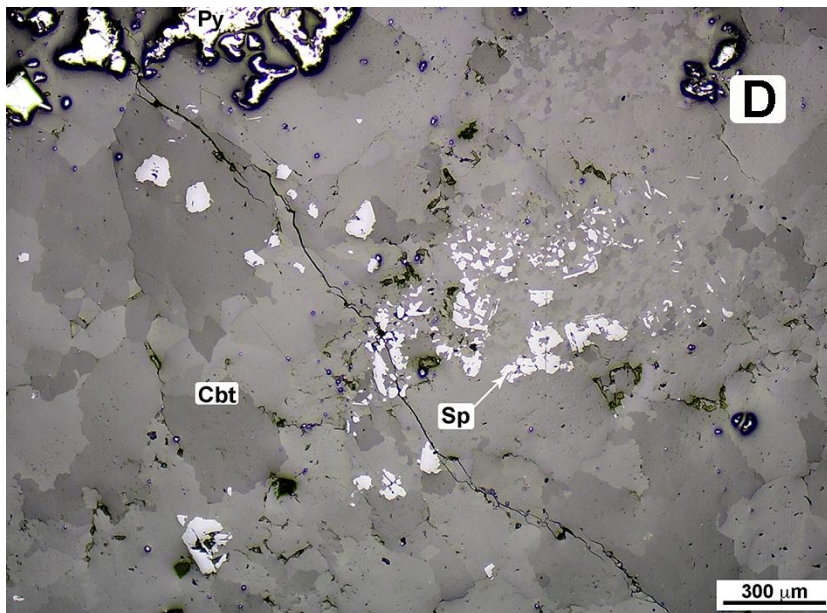
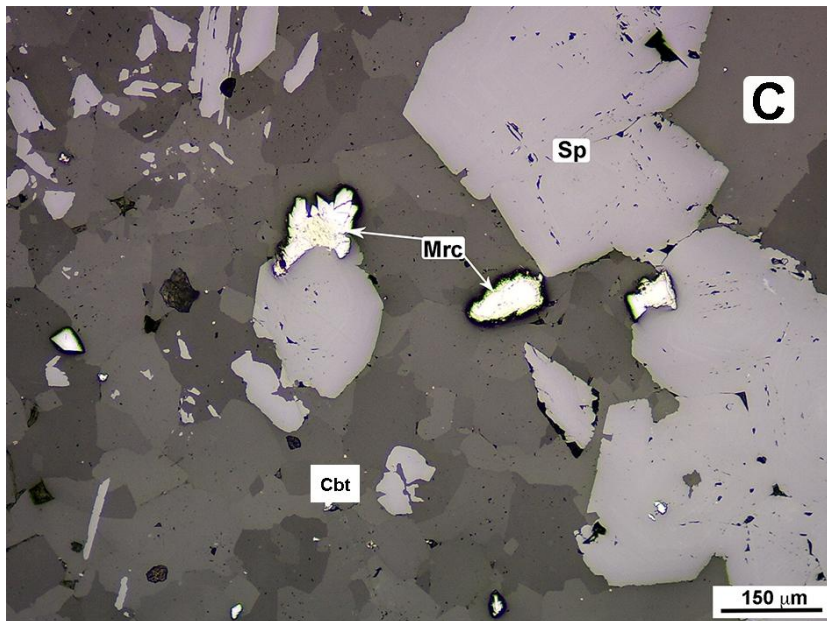


Los yacimientos MVT (Mississippi Valley Type) se forman en rocas carbonatadas, a temperaturas relativamente bajas entre 100 y 200°C. En estos yacimientos de Pb-Zn, el sulfuro de hierro más común es la marcasita, que acompaña a los sulfuros de Pb y Zn.



A: Yacimiento de Reocín (Cantabria, España). Imagen de marcasita (Mrc) masiva acompañada de algunos minerales de la ganga. La marcasita predomina sobre la pirita como sulfuro de hierro más abundante.

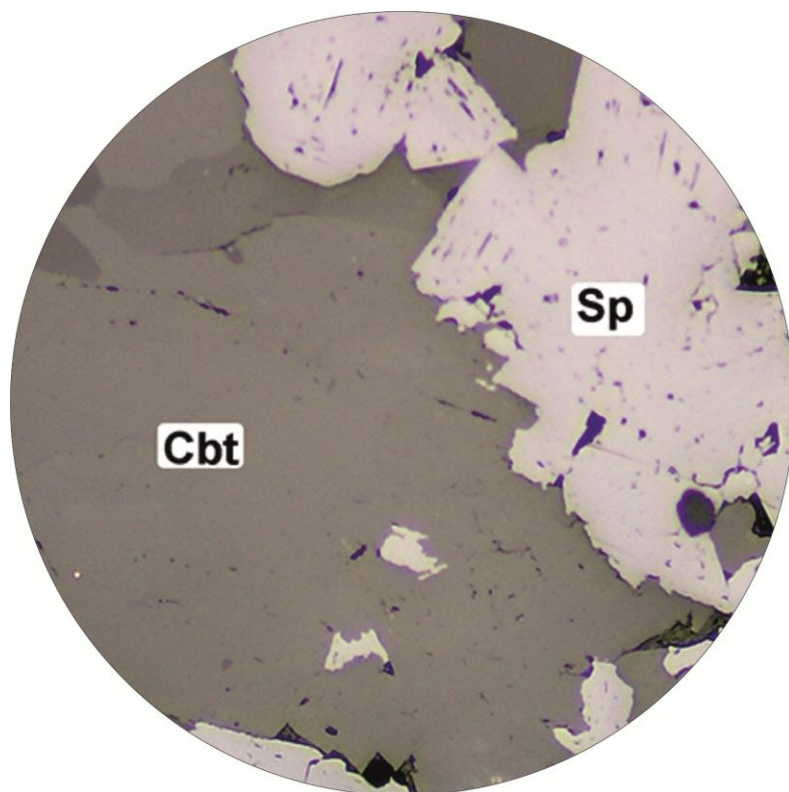
B: Imagen anterior con dos polarizadores. Se pueden observar los colores verdes y azules característicos de la anisotropía de la marcasita.

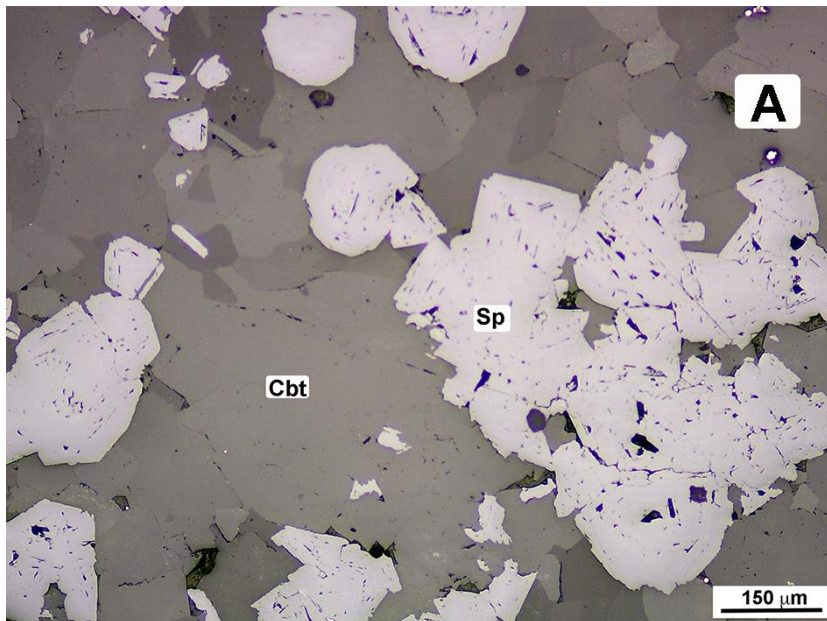


C: Cristales con morfología de cresta de gallo, típica de marcasita (Mrc), acompañada de esfalerita (Sp) idiomorfa o subidiomorfa, y dolomita (Cbt: carbonatos) como minerales de la ganga. Los carbonatos, aunque son minerales transparentes, se distinguen bien por la birreflexión que presentan.

D: Esfaleritas (Sp) diseminadas en la masa de dolomita (Cbt) y pirita (Py) en la zona superior de la muestra.

Yacimientos tipo Mississippi Valley. Reocín (Cantabria, España) (2)



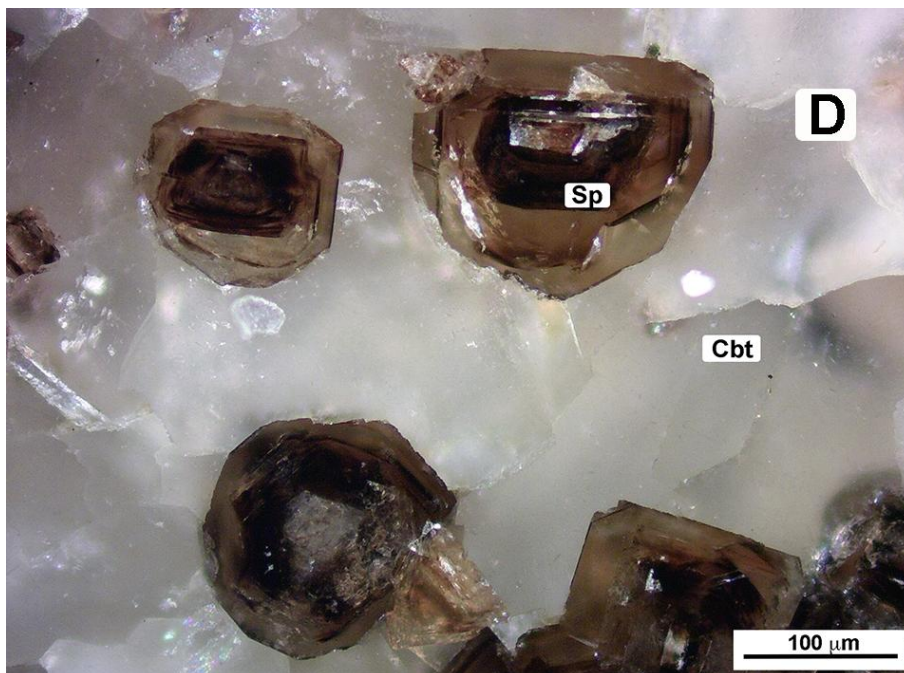
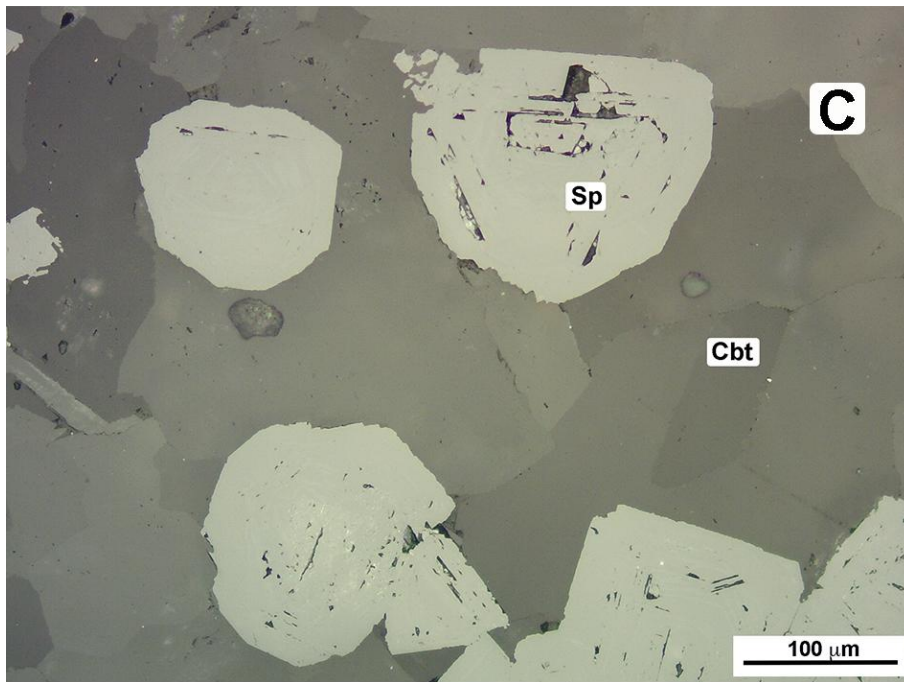


En el yacimiento de Reocín (Cantabria, España) la esfalerita tiene contenidos variables en Fe. Esto se traduce en que los cristales de esfalerita presentan zonados que se pueden observar ópticamente por la variabilidad de las reflexiones internas de los cristales.



A: Cristales euhedrales de esfalerita (Sp) asociados a dolomita (Cbt). Se puede observar la birreflexión de la dolomita por la diferente reflectividad de sus granos.

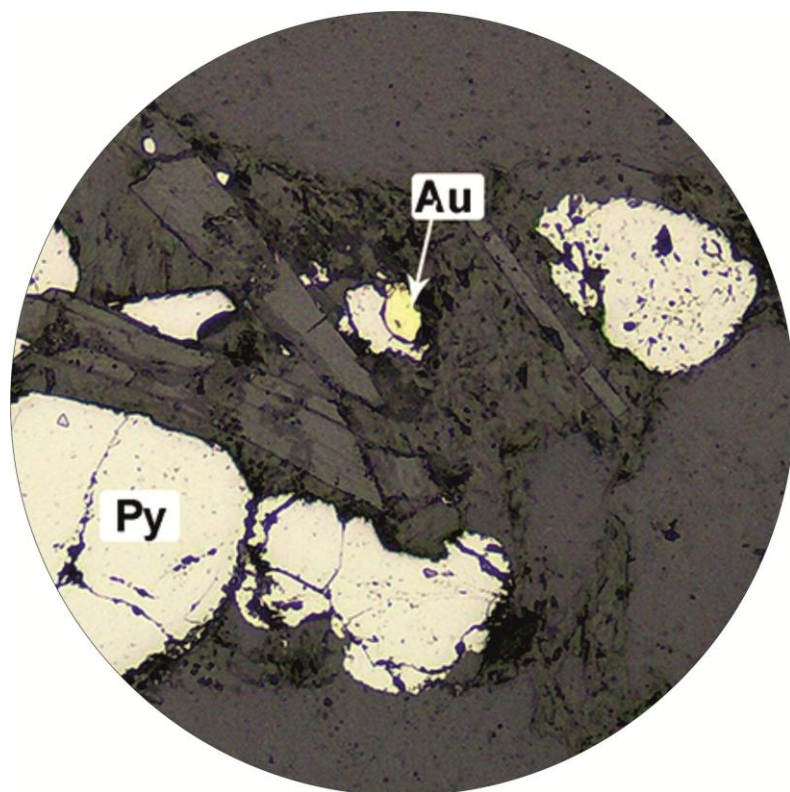
B: Imagen anterior con dos polarizadores. Se puede observar la variación de las reflexiones internas de la esfalerita (Sp) debido al zonado oscilatorio que produce la variación del contenido en hierro. La dolomita (Cbt) presenta reflexiones internas masivas de color blanco, como corresponde a los minerales transparentes.

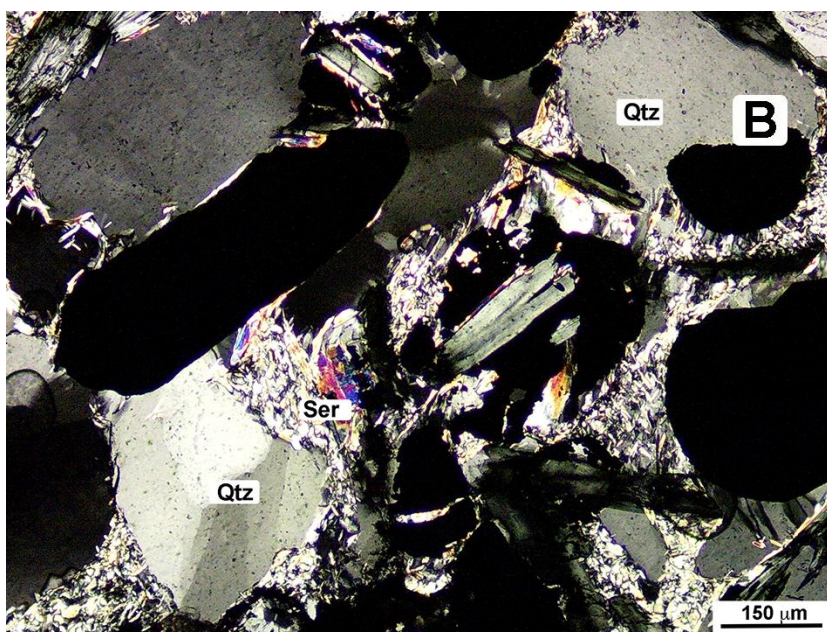
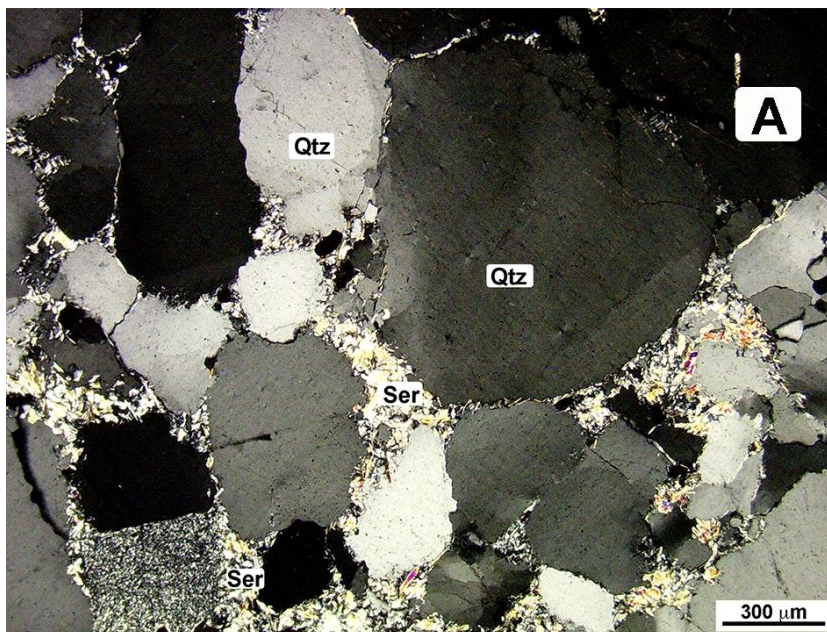


C: Detalle de cristales idiomorfos de esfalerita (Sp) en dolomita (Cbt). En los cristales de esfalerita se pueden observar diferentes etapas de crecimiento, que se reflejan en la discontinuidad de la superficie de los cristales.

D: Imagen anterior con dos polarizadores. Las reflexiones internas de la esfalerita son mas oscuras en el núcleo de los cristales mientras que en el borde son mas claras por un menor contenido en Fe.

Yacimientos de oro en materiales sedimentarios del Precámbrico. Witwatersrand (Sudáfrica) (1)

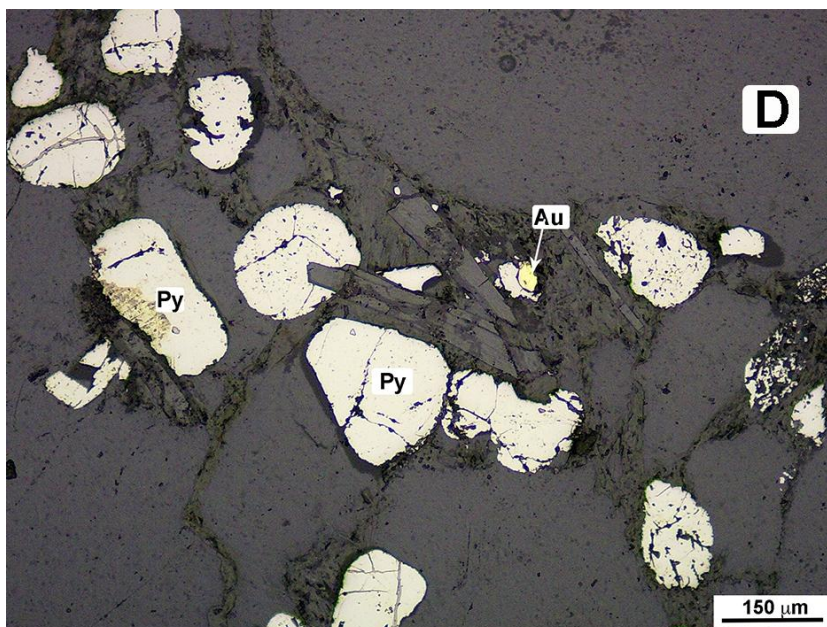
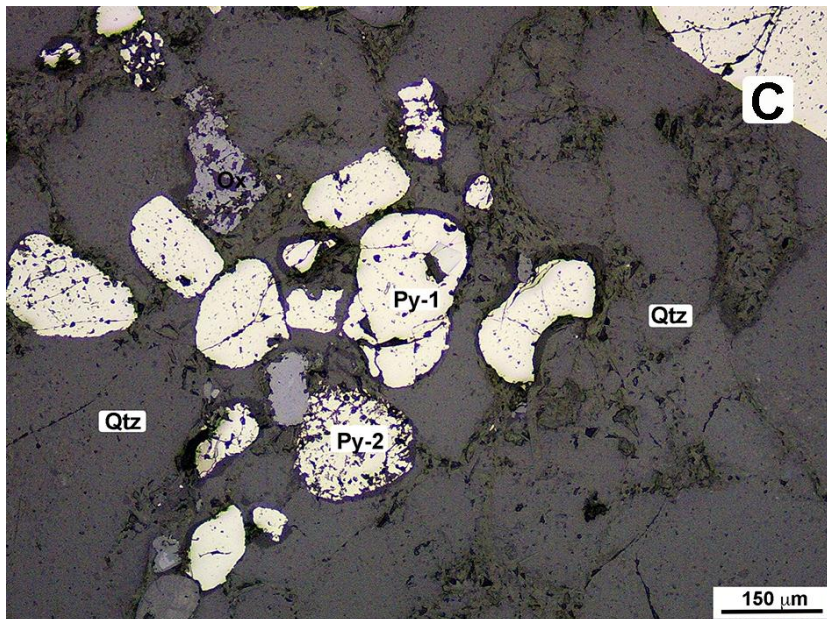




Witwatersrand es el distrito aurífero mayor del mundo. Numerosos artículos se han escrito sobre sus características y origen. Las mineralizaciones de oro de Witwatersrand se asocian a conglomerados de cantos de cuarzo y pirita asociada, con una matriz de filosilicatos (generalmente sericita) y cuarzo. El origen de la mineralización se mantiene en discusión entre los defensores de yacimientos de tipo placer y aquellos que postulan un origen hidrotermal de estos yacimientos.

A: Sericita (Ser) y cuarzo (Qtz) en la matriz de los conglomerados. Imagen con luz transmitida y dos polarizadores.

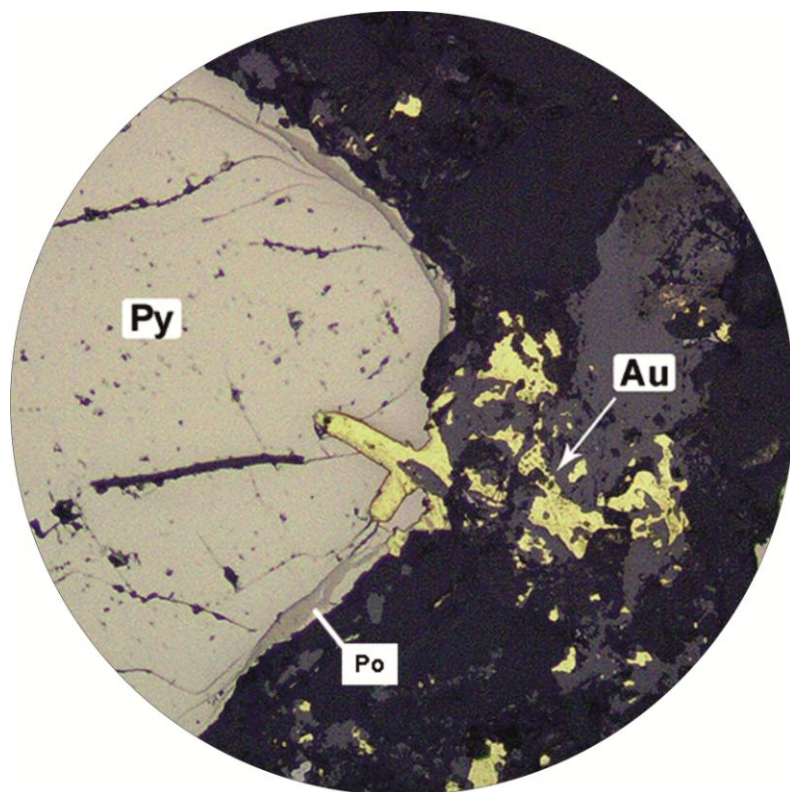
B: Imagen con luz transmitida y dos polarizadores. Se puede observar sericita (Ser) y cuarzo (Qtz) en la matriz del conglomerado de cuarzo. También hay minerales opacos que se observan negros en la imagen.

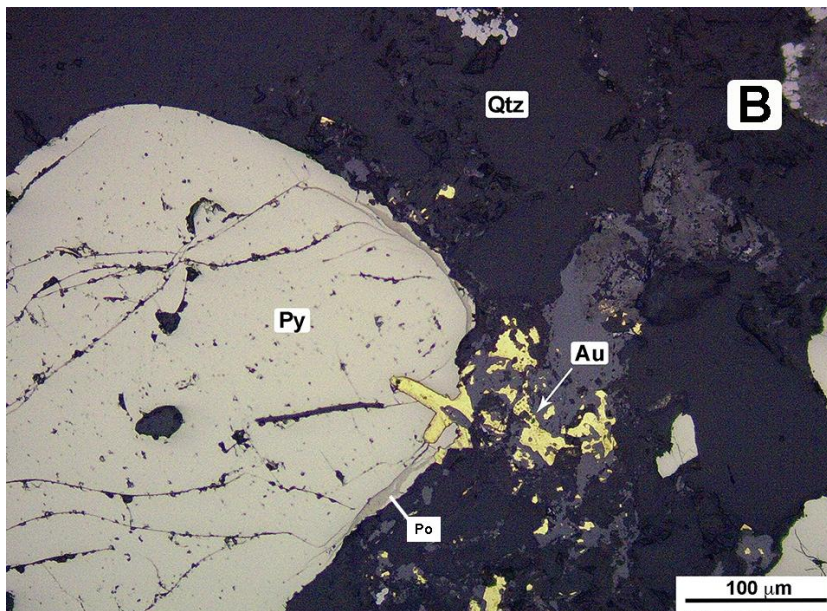
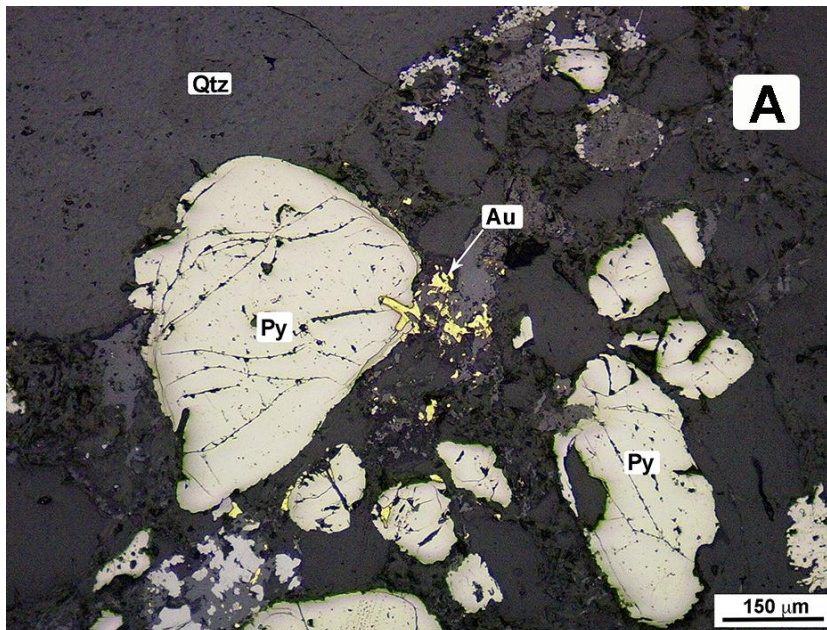


C: Luz reflejada. Junto con el cuarzo (Qtz) se encuentran minerales opacos, principalmente pirita (Py-1) con morfologías redondeadas, que pueden indicar su origen autigénico o transportado. Hay también otros granos de pirita (Py-2) con características texturales diferentes, lo que indica distintos estadios de mineralización.

D: Granos de pirita (Py) con morfologías redondeadas, alguno de ellos con fisuras rellenas de calcopirita. En el centro de la imagen se observa un grano de oro (Au) asociado a la pirita.

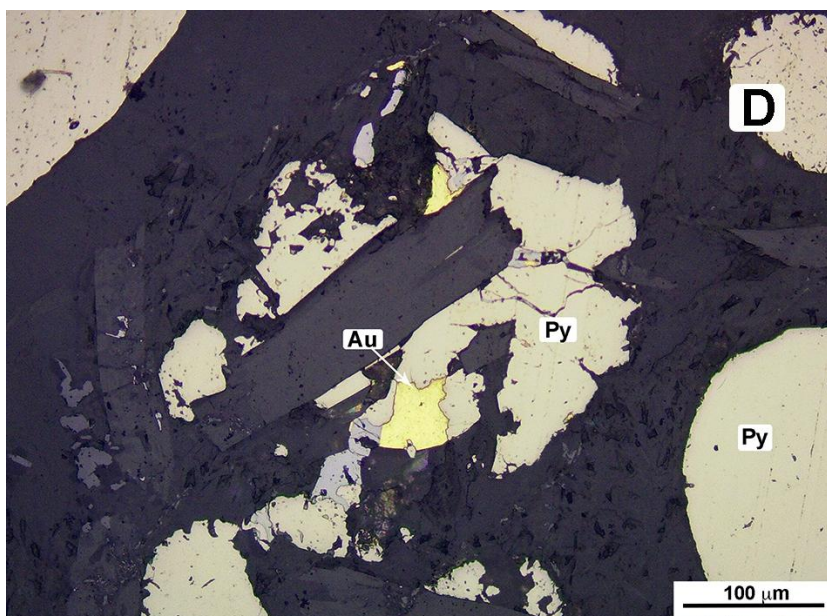
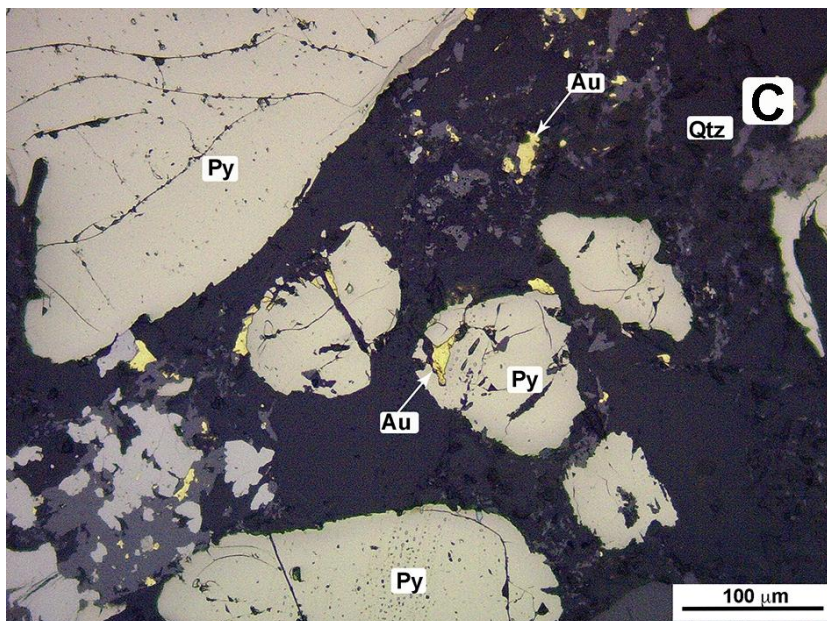
Yacimientos de oro en materiales sedimentarios del Precámbrico. Witwatersrand (Sudáfrica) (2)





A: Granos de oro (Au) situados en borde de pirita (Py), en una matriz de cuarzo (Qtz). Algunos granos de oro se sitúan en los bordes de los cristales y otros en los intersticios de los granos de pirita.

B: Detalle de la imagen anterior. En los granos de pirita (Py) se pueden observar varias etapas de crecimiento. El oro (Au) se asociaría a las etapas más tardías. También hay algo de pirrotina (Po) en los bordes del grano de pirita.



C: Además de a pirita (Py), los granos de oro (Au) se pueden asociar a fases de óxidos, probablemente uraninita, diseminados en la matriz.

D: Otra muestra con pequeños granos de oro (Au) asociados a pirita (Py) y otras fases minerales, probablemente uraninita.

Agradecimientos

Un manual de este tipo es el resultado de muchos años de trabajo, para reunir y estudiar las muestras de las que obtener los ejemplos mas interesantes desde el punto de vista didáctico. Gracias a todos mis compañeros de departamento de Cristalografía y Mineralogía, (hoy Mineralogía y Petrología) que, a lo largo de este tiempo, me han acompañado en mis labores docentes, especialmente a Sol López Andrés, compañera de trabajo desde mis comienzos a la actualidad, con la que he compartido los mejores y peores momentos de nuestra andadura profesional. Especial agradecimiento a Roberto Oyarzun, con el que he compartido desde hace mas de 30 años, innumerables horas en el despacho, las aulas y el campo, tratando de mejorar las enseñanzas para nuestros alumnos del área de los Recursos Minerales; su visión de la ciencia y de la vida, me ha proporcionado elementos de discusión (en el sentido francés del término) y reflexión que me han ayudado en el caminar diario, y a mejorar en todos los aspectos. Muchas gracias a Paloma Cubas, cuya ayuda, siempre desinteresada, ha permitido, junto a Roberto, que este documento, sea mas legible y ordenado, sin ella no hubiera sido posible. También agradecerle su presencia en las labores de campo, siempre nos ha enriquecido con su visión botánica y personal. Gracias a los cientos y cientos de estudiantes a los que he tenido la suerte de explicar alguna de las clases que he impartido durante 39 años; gracias a ellos he tenido que esforzarme e intentar hacer mejor las cosas, siempre han sido mi acicate a lo largo de estos años. Finalmente expresar mi agradecimiento a la Universidad Complutense de Madrid, que me ha acogido, desde mis tiempos de estudiante hasta mi próximo retiro a fines de Febrero de 2019. En ella se ha desarrollado mi vida profesional, me ha ofrecido todos sus recursos y yo le he dado lo mejor que he tenido, he pasado en ella mas horas que en cualquier otro lugar, por lo que puedo decir que ha sido mi casa a lo largo de casi 50 años.

José Ángel López García

Madrid, Febrero de 2019

Bibliografía

1. Sobre microscopía de luz reflejada:

Cameron EN (1961) Ore microscopy. John Wiley & Sons, 293 pp.

Craig J, Vaughan D (1982) Ore microscopy and ore petrography. John Wiley and Sons, 406 pp.

Ineson P (1989) Introduction to practical ore microscopy. Routledge, 192 pp.

Pracejus B (2008) The ore minerals under the microscope: an optical guide. Elsevier Science, 894 pp.

Picot P, Johan Z (1982) Atlas of ore minerals. Elsevier Scientific Publishing Co, 458 pp.

Ramdohr P (1980) The ore minerals and their intergrowths. Pergamon, 1269 pp.

Shouten C (1962) Determination tables for ore microscopy. Elsevier Science Ltd, 242 pp.

Taylor R (2009) Ore Textures. Springer-Verlag, 288 pp.

Uytenbogaardt W, Burke E (1971) Tables for microscopic identification of ore minerals. Elsevier Science Ltd, 443 pp.

2. Páginas web de interés

School of Earth, Atmospheric and Environmental Sciences (2019) Microscopy@-Manchester.
www.microscopy.manchester.ac.uk/

JISC (2019) Metalliferous Ores. Virtual Microscope, The Open university,
www.virtualmicroscope.org/content/metalliferous-ores

3. Trabajos seleccionados sobre los yacimientos tratados en el texto

Yacimiento de Cr y Fe-Ti de Bushveld:

Lee CA, (1996) A review of mineralization in the Bushveld complex and some other layered mafic intrusions. RG Cawthorn (Ed), Layered Intrusions, Amsterdam, Elsevier, 103-146.

Maier WD, Barnes S-J, Groves DI (2013) The Bushveld Complex, South Africa: formation of platinum-palladium, chrome- and vanadium-rich layers via hydrodynamic sorting of a mobilized cumulate slurry in a large, relatively slowly cooling, subsiding magma chamber. Mineralium Deposita, 48, 1-56.

Yacimientos de Cr en ofiolitas:

Gervilla F, Leblanc M (1990) Magmatic Ores in High-Temperature Alpine-Type Lherzolite Massifs. (Ronda, Spain, and Beni Bousera, Morocco). Economic Geology, 85, 112-132.

Yacimientos de Ni-Cu de Pechenga:

Grokhovskaya TL, Bakaev GF, Sholokhnev VV., Voitekhovich VS (2003) The PGE ore mineralization in the Monchegorsk magmatic layered complex (Kola Peninsula, Russia), *Geol. Ore Deposits*, 45, 287–308.

Yacimiento de Ni-Cu de Aguablanca:

Piña R. (2018) The Ni-Cu-(PGE) Aguablanca Ore Deposit (SW Spain) *Springer Briefs in World Mineral Deposits*, 78 pp.

Yacimiento de Cr-Ni de Ojén y Carratraca:

Torres-Ruiz J, Garuti G Gazzotti M Gervilla F, Fenoll Hach-Ali P (1996) Platinum-group minerals in chromitites from the Ojen Iherzolite massif (Serranía de Ronda, Betic Cordillera, Southern Spain), *Mineralogy and Petrology*, 56, 25–50.

Yacimientos de W-Sn de Panasqueira:

Foxford KA, Nicholson R, Polya DA (1991) Textural evolution of W-Cu-Sn-bearing hydrothermal veins at Minas da Panasqueira, Portugal. *Mineralogical Magazine*, 55, 435-445.

Skarn de Carlés, El Valle-Boinás:

Martín-Izard A, Cepedal A, Fuertes-Fuente M, Nistal SG, García-Nieto J, Pevida LR (2006) Guía de la visita a los yacimientos de Au-Cu (Carlés y El Valle-Boinás) del cinturón del río Narcea. XXVI Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía, 20 pp.

Pórfido de Chuquicamata y Mina Carmen (Chile):

Ossandón G, Fréaut R, Gustafson L, Lindsay D, Zentilli, M (2001). Geology of the Chuquicamata Mine: A Progress Report. *Economic Geology* 96, 249-270.

Guzmán J, Collao S, Oyarzun R (2000) Andacollo copper-gold district, La Serena, Chile: preliminary data from the porphyry copper and possible relationships between Cu and Au mineralization. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Sec. B*, 109, 121-125.

Epitermales de El Indio (Chile) y Rodalquilar:

Jannas R, Bowers T, Petersen U, Beane R (1999) High-sulfidation deposit types in the El Indio District, Chile. *Society of Economic Geologists Special Publication* 7, 219–266.

Arribas A (Jr), Cunningham C, Rytuba JJ, Rye RO, Kelly WC, Podwysocki MH, McKee EH, Tosdal RM (1995) Geology, geochronology, fluid inclusions, and isotope geochemistry of the Rodalquilar gold-alunite deposit, Spain. *Economic Geology*, 90, 795–822.

Yacimiento de Neves Corvo (Portugal):

Gaspar OC (2002) Mineralogy and sulfide mineral chemistry of the Neves–Corvo ores, Portugal: insight into their genesis. *Canadian Mineralogist*, 40, 611-636.

Yacimiento de Reocín:

Velasco F, Herrero JM, Yusta I (2003) Geology and geochemistry of the Reocín Zinc-Lead deposit, Basque-Cantabrian Basin, Northern Spain. *Economic Geology*, 98, 1371–1396.

Distrito aurifero de Witwatersrand:

Tucker RF, Viljoen RP, Viljoen MJ (2016) A Review of the Witwatersrand Basin-The World's greatest goldfield. Episodes, 39, 105-133.