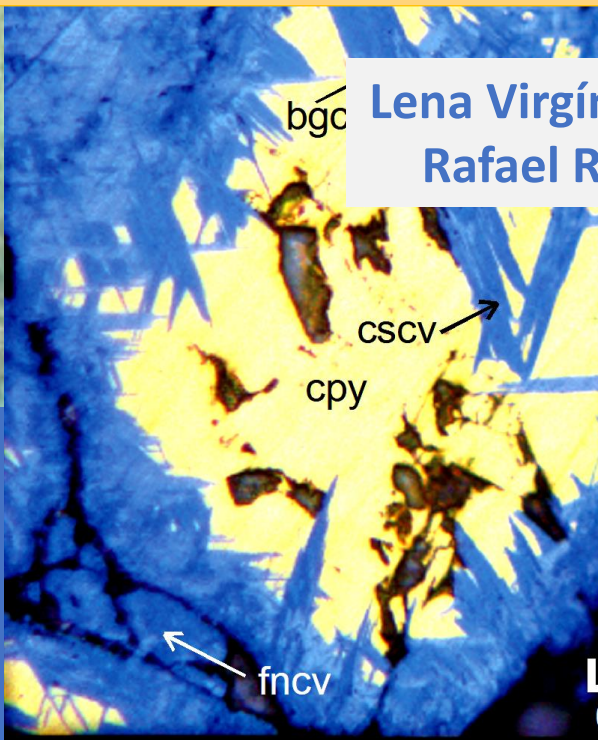
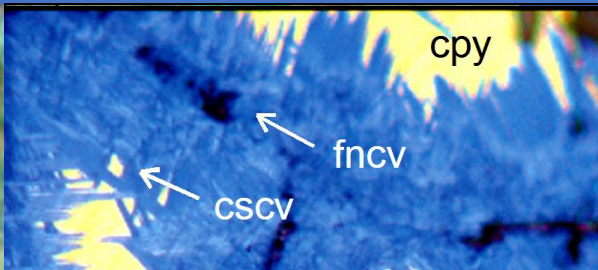


Texturas Secundárias (Minerais de Minério Supérgeno)



Lena Virgínia Soares Monteiro
Rafael Rodrigues de Assis

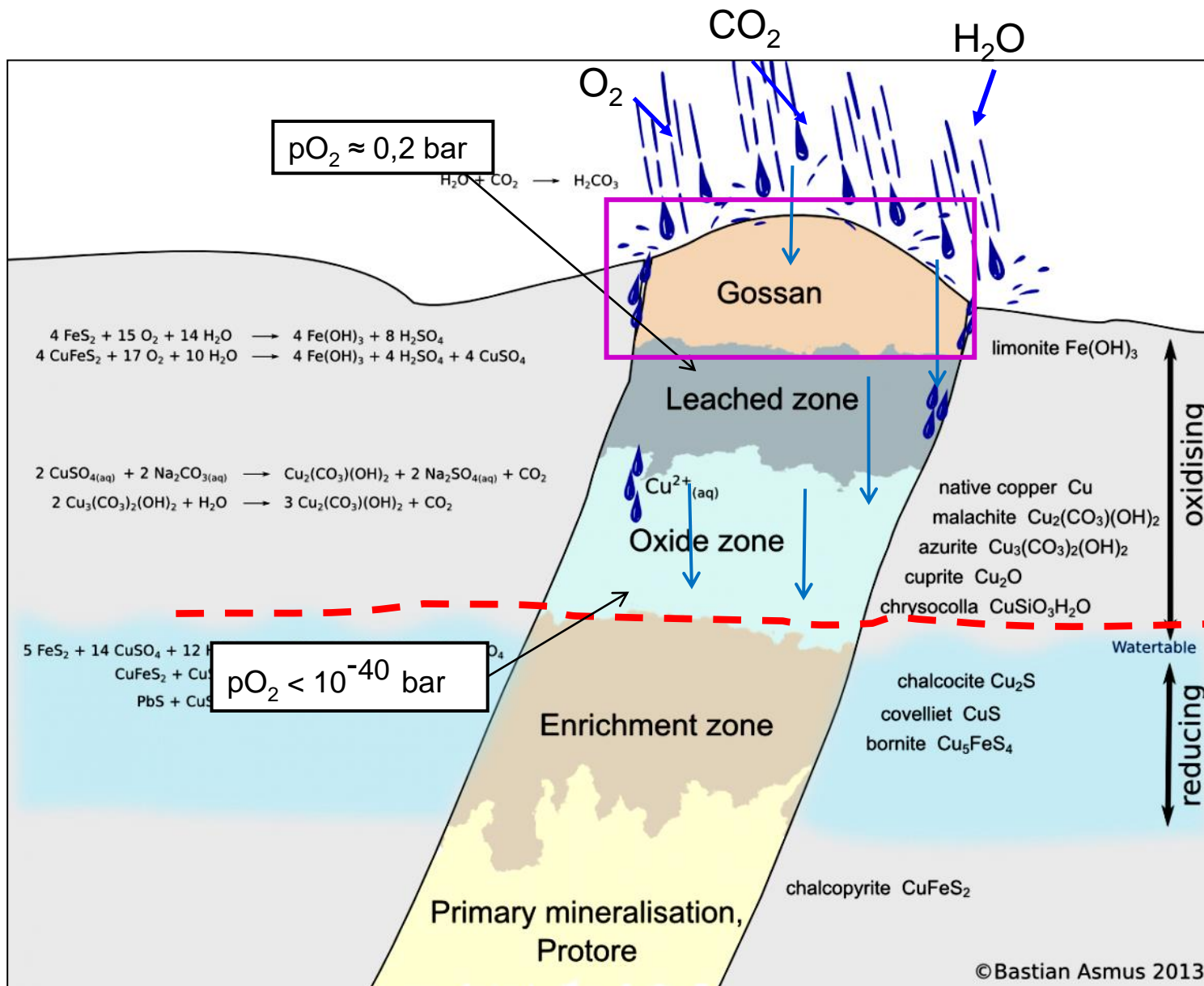


Malachite and Chrysocolla Combination from the Star of the Congo Mine;
<https://borenandkingminerals.com/product/malachite-chrysocolla-congo-2/>

<https://kimberley-foundation.org/2018/05/sediment-hosted-ore-deposits-tour-blog-part-4/>

www.geo.arizona.edu/Antevs/Theses/Enders/index.html

Zonas do Perfil de Alteração Supérgena sobre Rochas Portadoras de Sulfetos



Gossan (Chapéu de ferro):
constituído por **materiais oxidados**
dominantemente ferruginosos (limonita)

Zona de oxidação

SLF

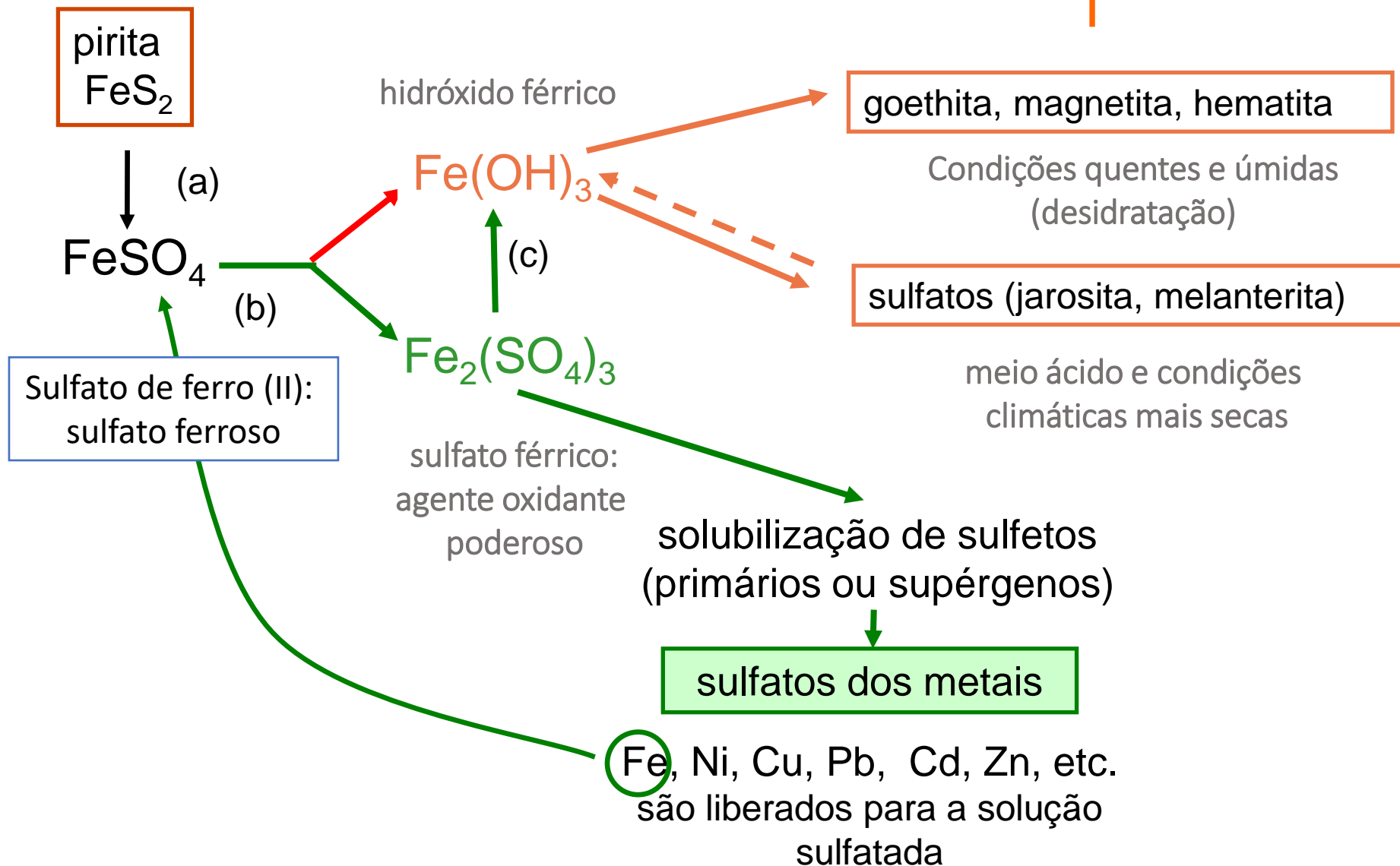
Zona de saturação ou de enriquecimento

Sulfeto primário

• Imagem de: <http://en.archaeometallurgie.de/gossan-iron-cap/>

alteração supérgena de pirita

Gossan e zona de oxidação



Gossan (Chapéu de Ferro)

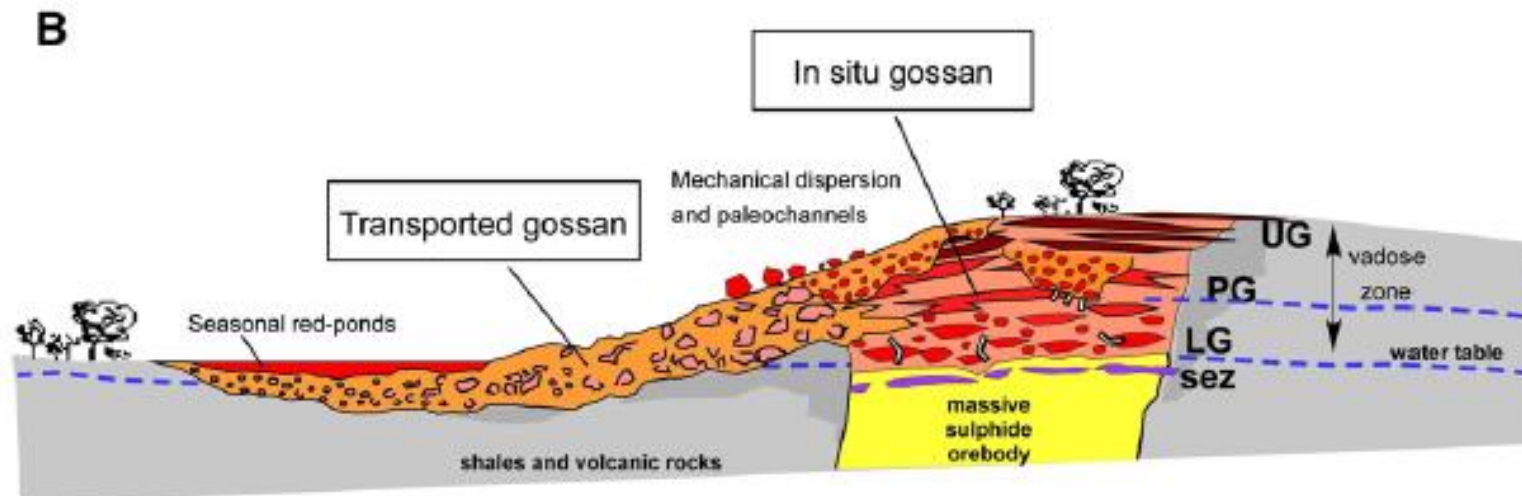


<http://www.redhawkresources.com/s/CopperCreek.asp?ReportID=116885>



Província de cobre do tipo pórfiro do SW-EUA, Arizona (esquerda)

Afloramento do gossan de Adi Nefas – VMS - Zn, Au, Cu – Eritreia (direita)



Depósitos VMS do Cinturão Piritoso Ibérico
Ore Geology Reviews, 53, 2013, p.186, fig. 3.

Mobilidade dos Metais na Presença de Sulfato Férrico

- $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$: é um agente essencial na alteração de sulfetos
 - torna oxidante níveis mais profundos do perfil de alteração.
 - é constantemente regenerado a partir de sulfetos portadores de ferro.
- os metais contidos nos sulfetos da mineralização primária são liberados na forma de sulfatos e serão diferentemente móveis de acordo com a solubilidade de seus sulfatos.

transporte dos sulfatos - migração dos metais

solubilidade dos sulfatos ----> mobilidade dos metais

Zn > Ni > Co > Cu > Fe > Ag > Pb

(Zn - 530g/l)

(Pb - 0,04g/l)

mais solúvel -----> menos solúvel

-----> ↓ mobilidade ----->

(temperatura $\approx 20^\circ\text{C}$)

veios e vênulas de hematita em gossan



http://tonatiuh.igeofcu.unam.mx/~ccanet/mant_gossan.jpg

<http://www.sydneyresource.com/i/photos/inde/gossan-vein-in-lime.jpg>

gossans



boxwork limonítico-goethítico



Martinelli, C. D'A., 1998, Tese doutorado, UNESP - Rio Claro (Mineralização aurífera dos Araés, Nova Xavantina, MT)

Gossan (Chapéu de Ferro)

Estruturas e microestruturas:

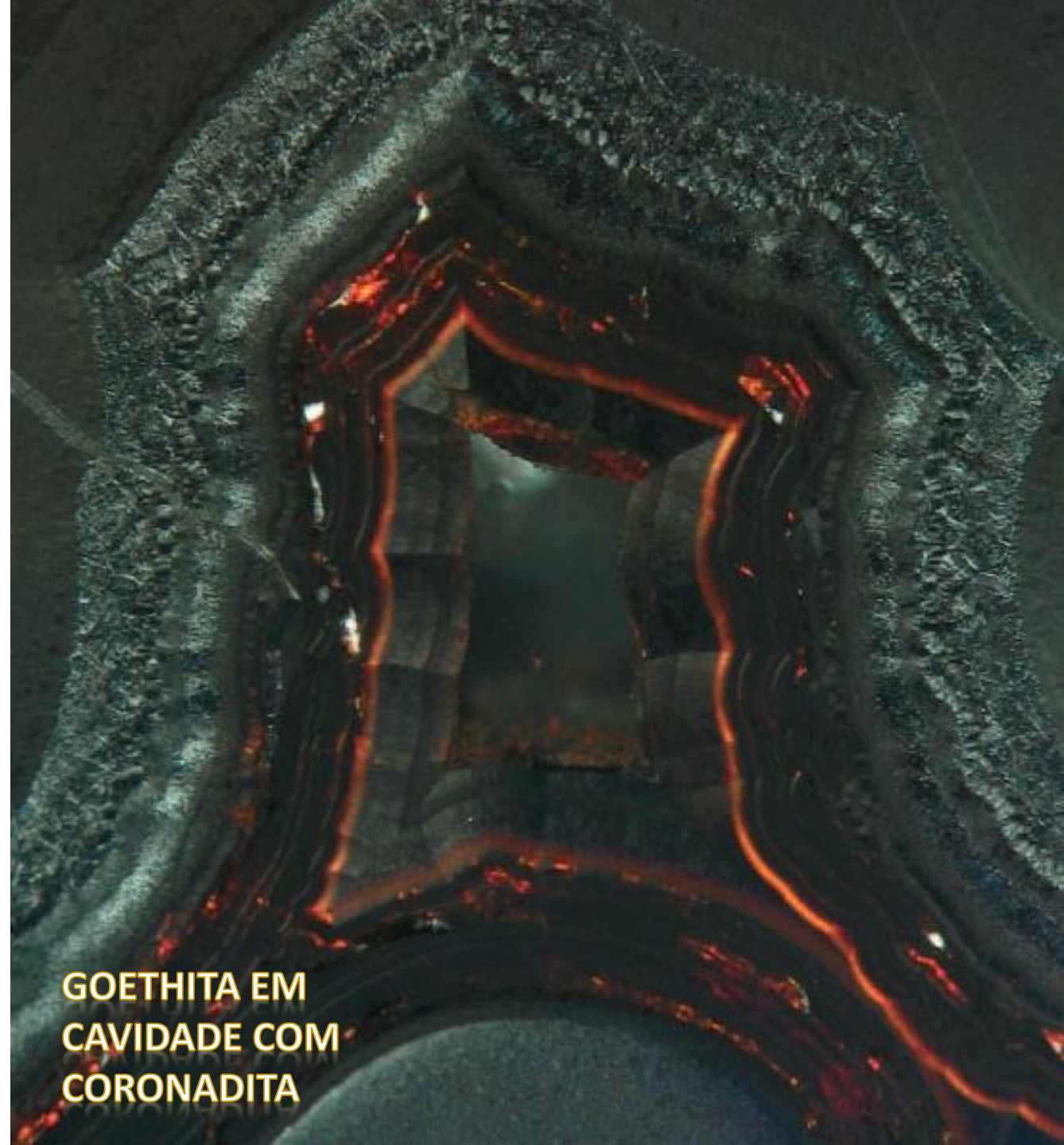
- ✓ residuais: **celular** ou *boxwork*.
- ✓ neoformadas: coloforme, concrecionária, fibrosa, etc.

Composição: limonita é o constituinte essencial

Limonita: mistura dominante de hidróxidos e óxidos de ferro hidratados ou não

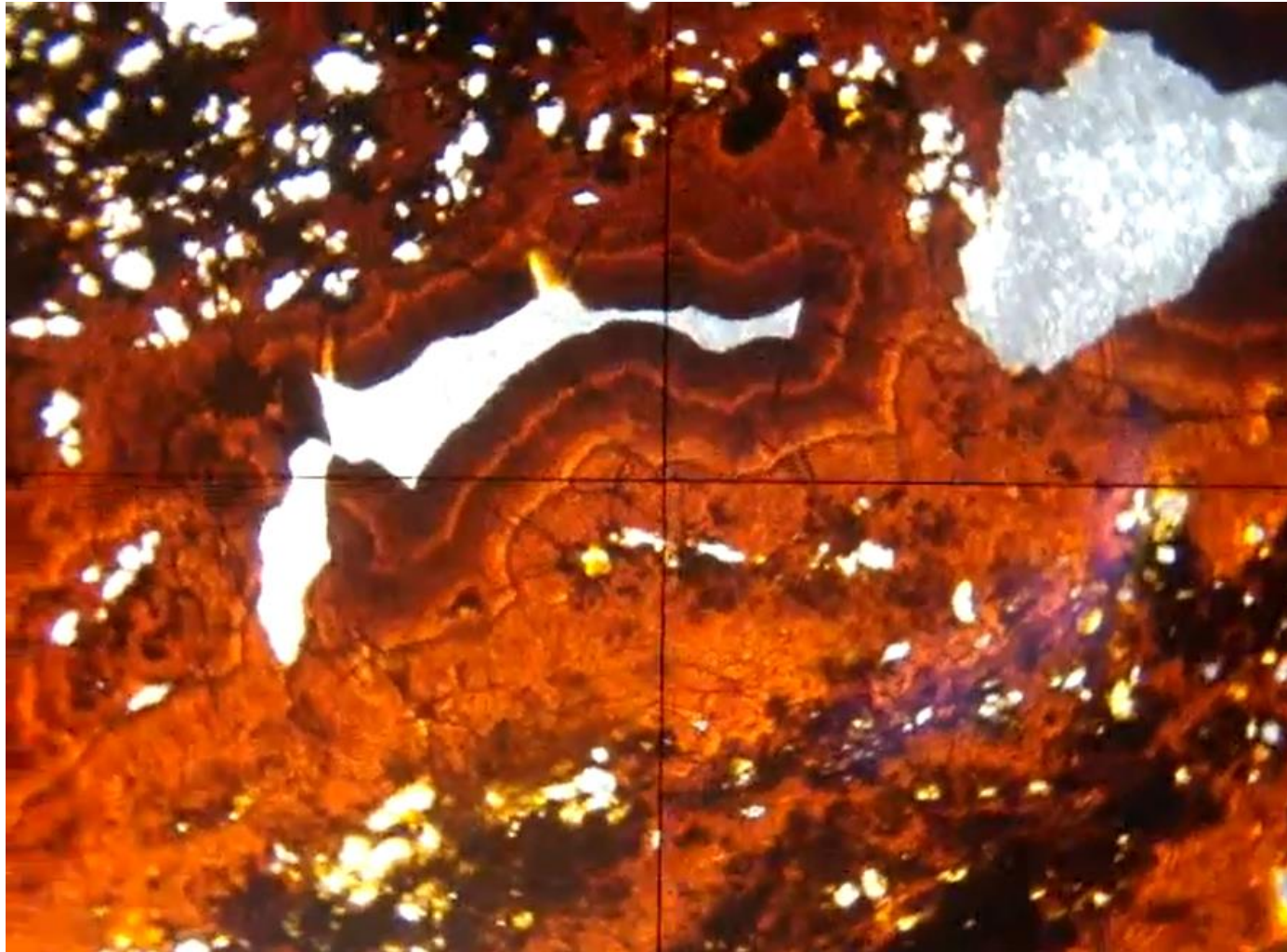
goethita, lepidocrocita, magnetita, hematita, melanterita, jarosita, ferrihidrita, etc.

Goethita: $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$
Coronadita: $\text{Pb}(\text{Mn})_8\text{O}_{16}$

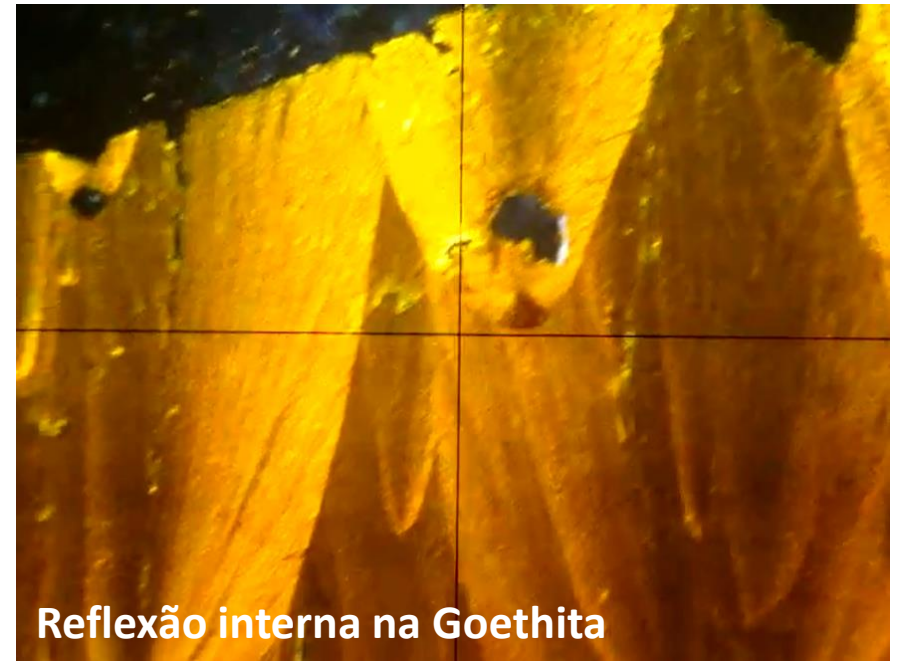


GOETHITA EM
CAVIDADE COM
CORONADITA

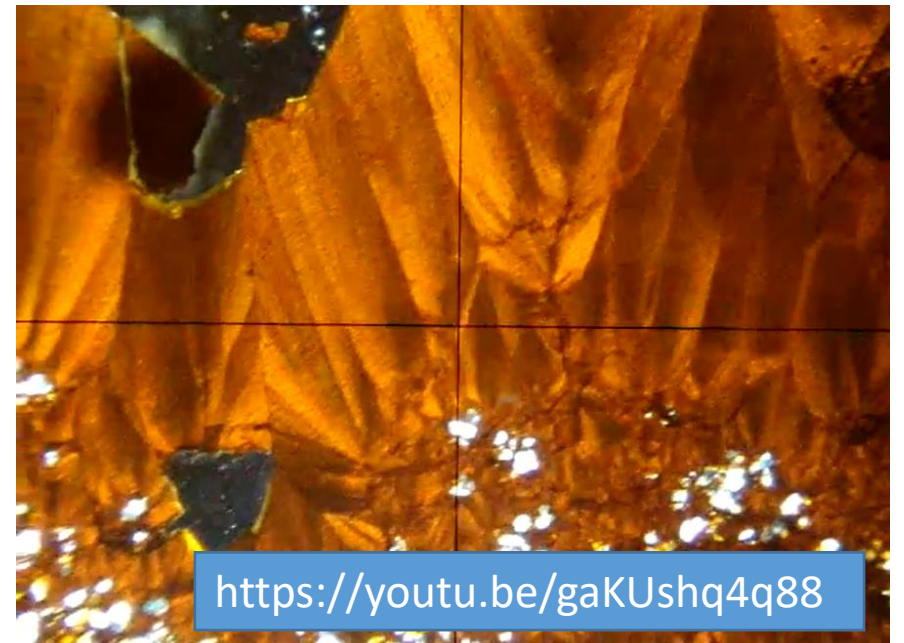
Goethita - $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$



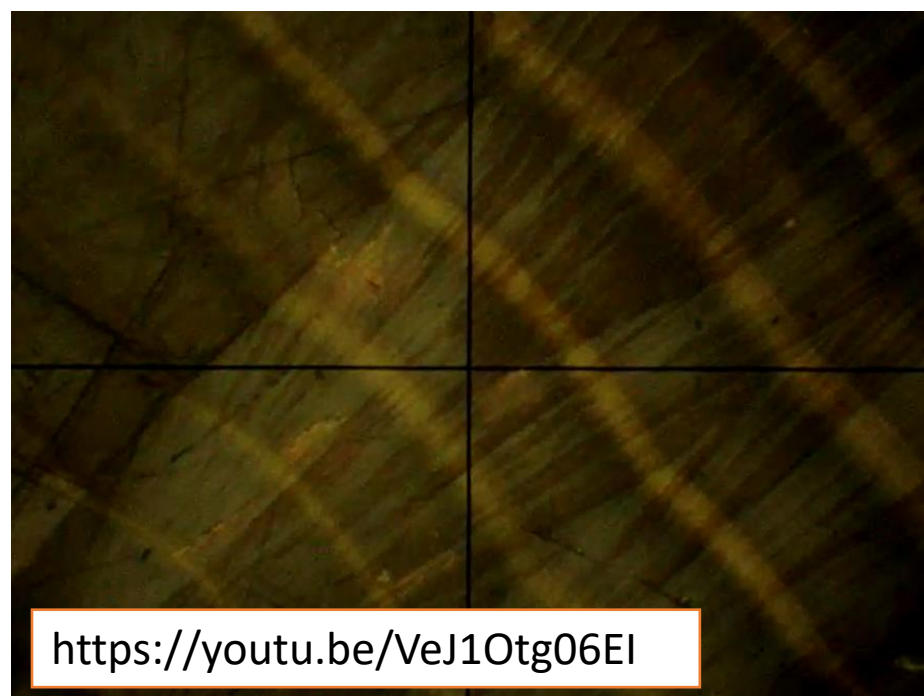
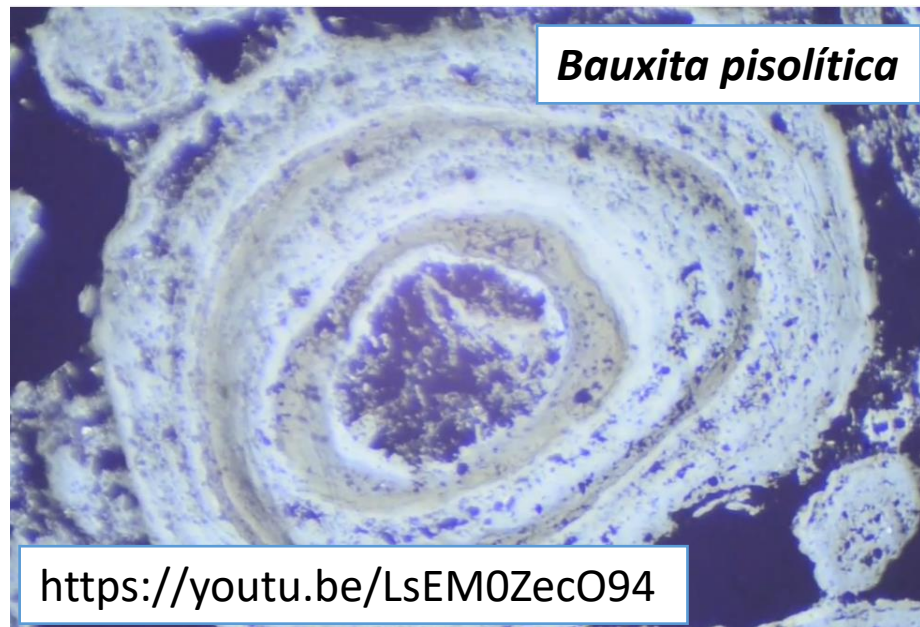
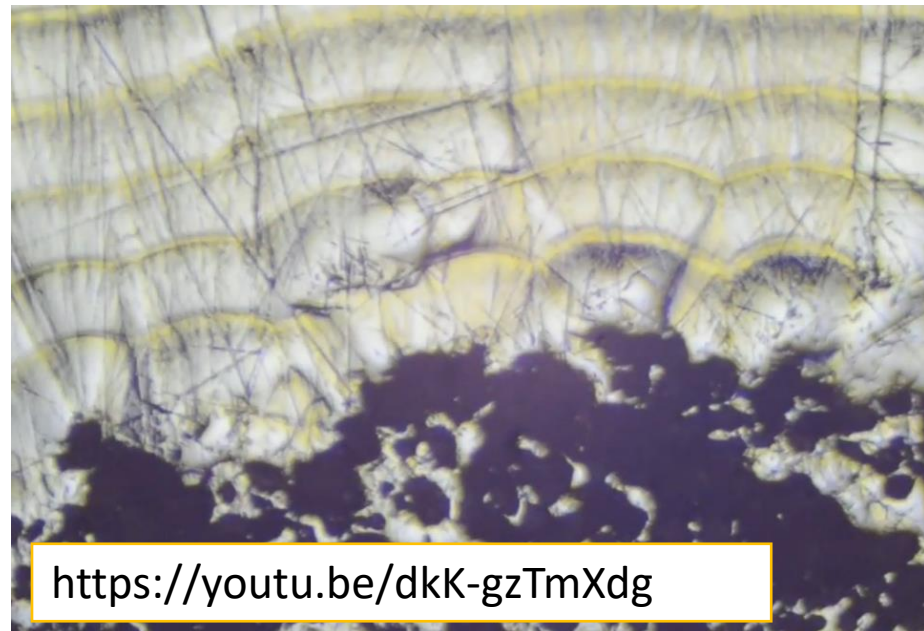
Luz transmitida: textura coloriforme, concêntrica, botrioidal, fibrosa em goethita



Reflexão interna na Goethita



<https://youtu.be/gaKUshq4q88>



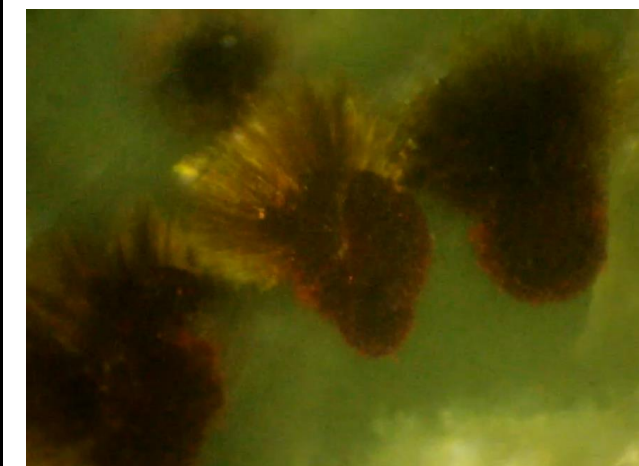
Sugestão de vídeos



Heinrich Frank
6,54 mil inscritos

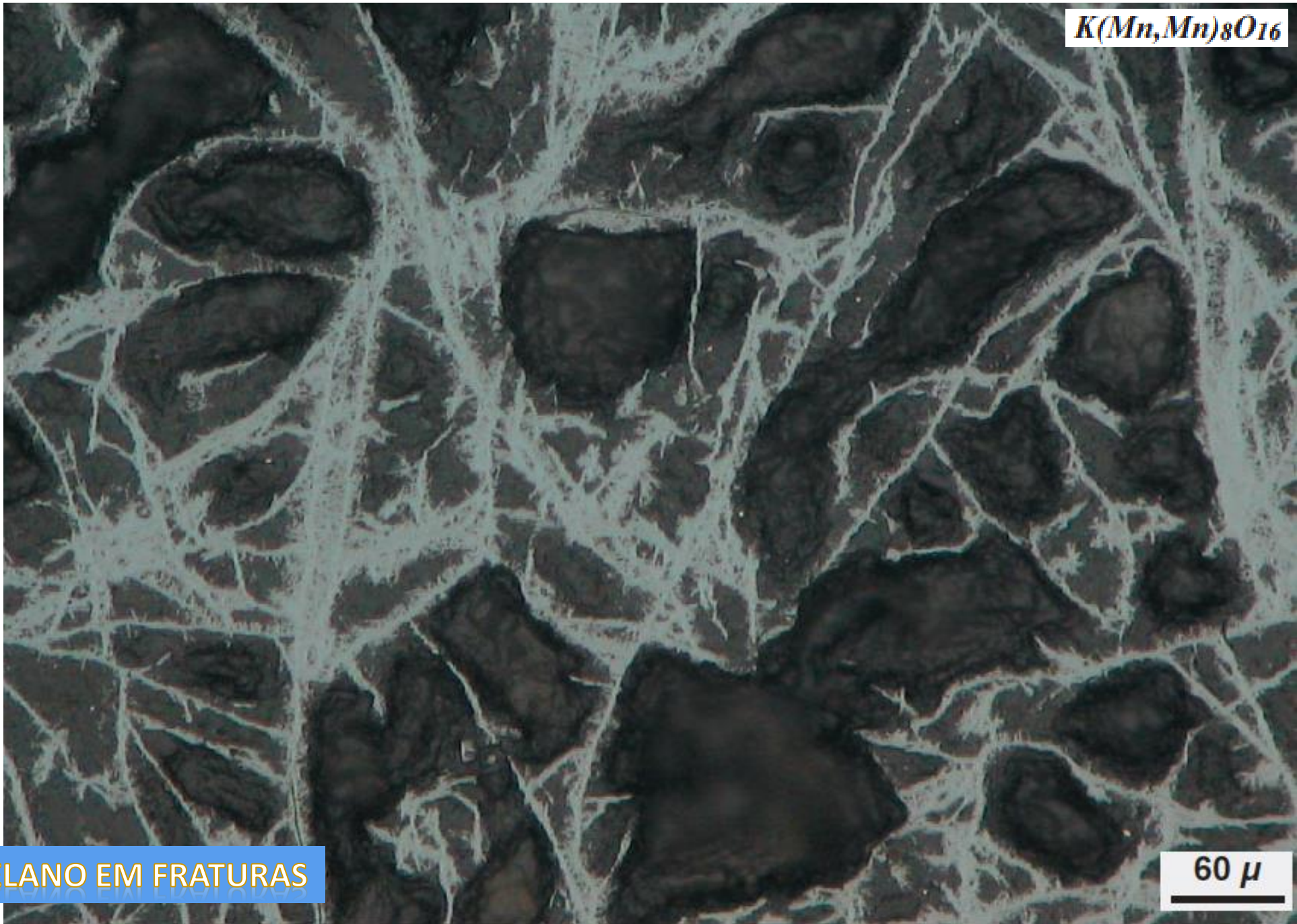
Goethita em luz refletida

Goethita
 $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$



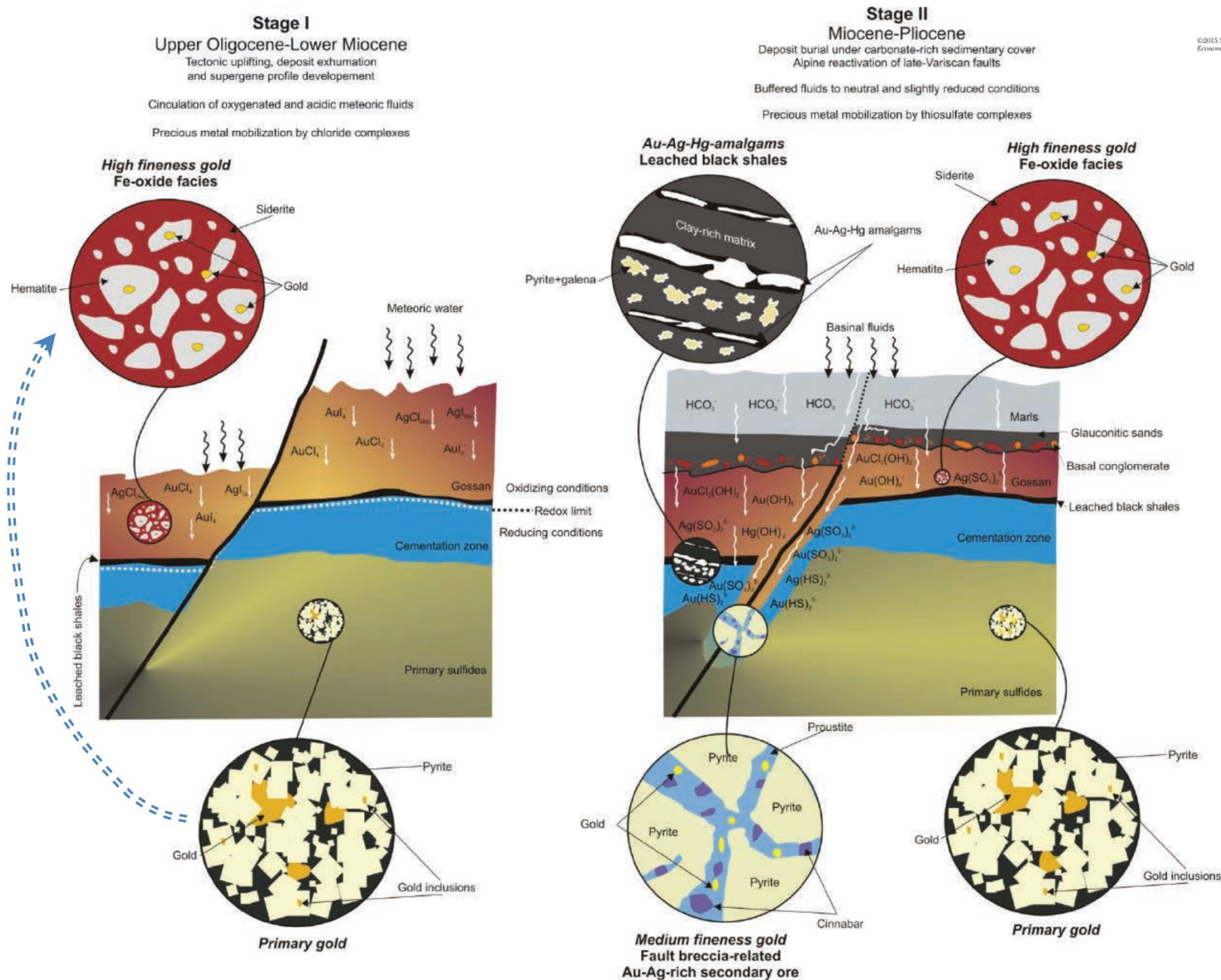
<https://youtu.be/rCi8a6wo8AU>

$K(Mn,Mn)_8O_{16}$



CRIPTOMELANO EM FRATURAS

60 μ



Gold Behavior in Supergene Profiles Under Changing Redox Conditions:
The Example of the Las Cruces Deposit, Iberian Pyrite Belt

LOLA YESARES,¹ THOMAS AIGLSPERGER,² REINALDO SÁEZ,¹ GABRIEL R. ALMODÓVAR,¹ JOSÉ MIGUEL NIETO,¹ JOAQUÍN A. PROENZA,² CARMELO GÓMEZ,³ AND JUAN MANUEL ESCOBAR³

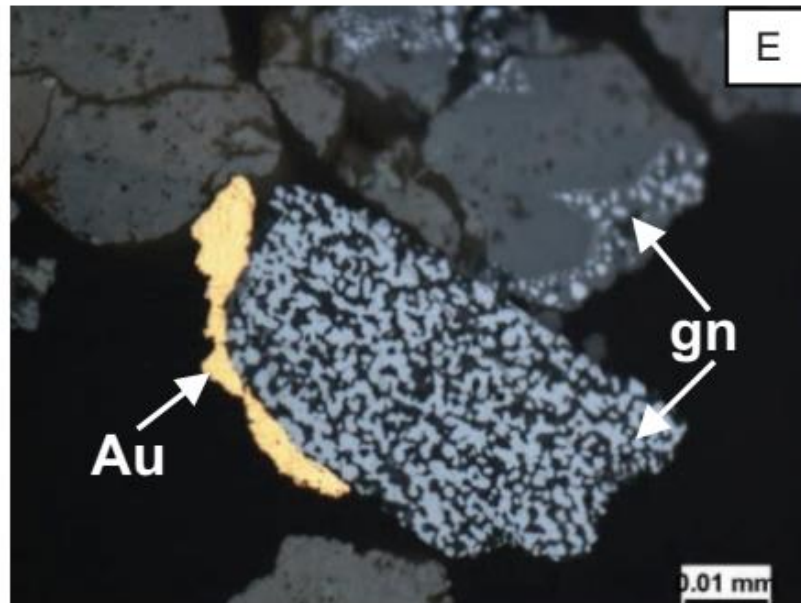
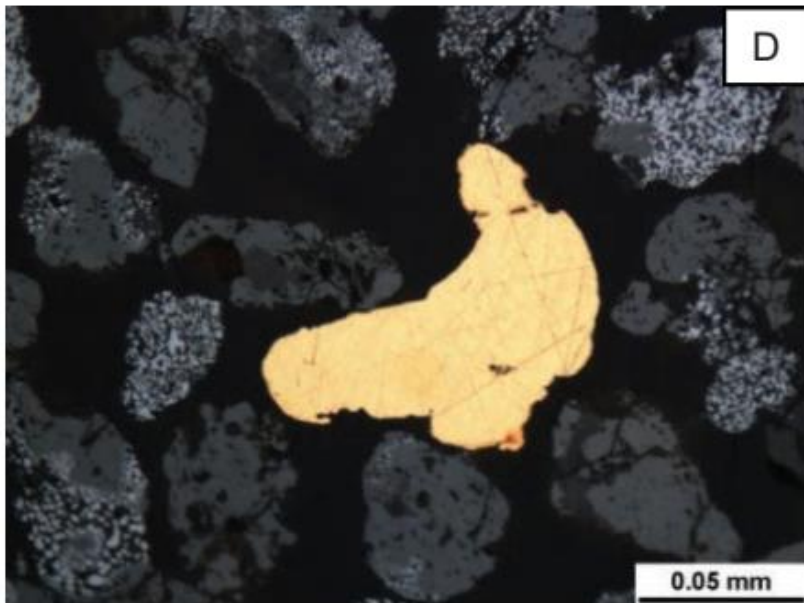
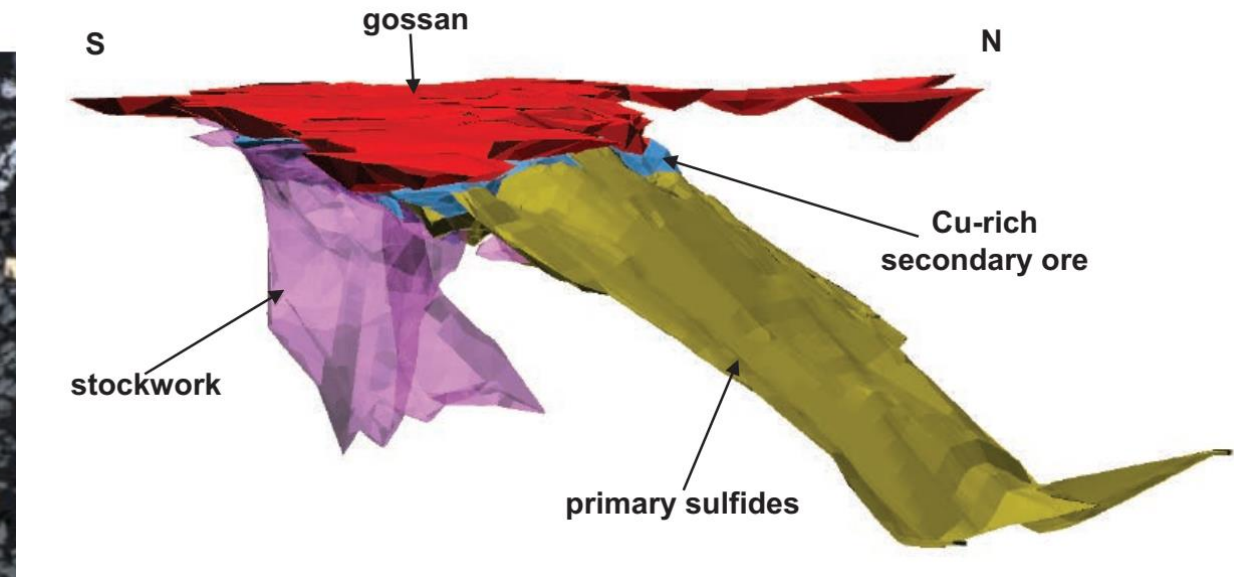
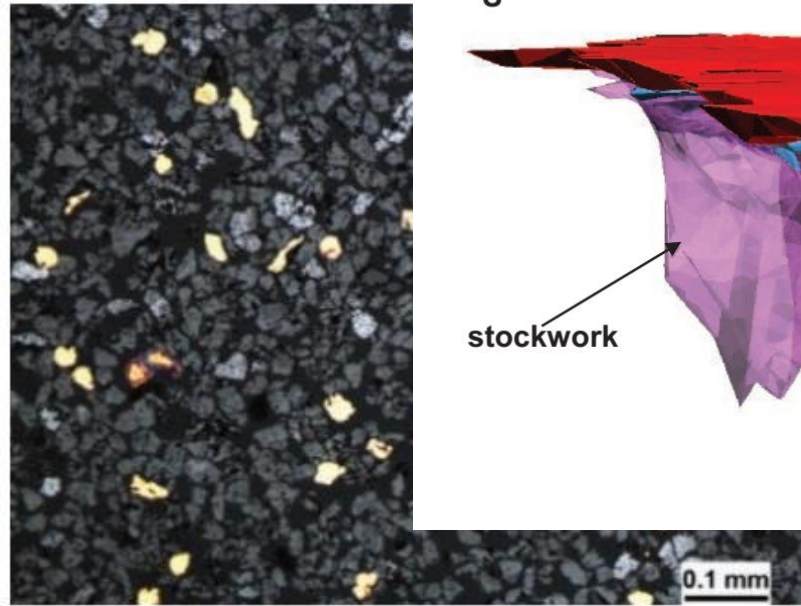
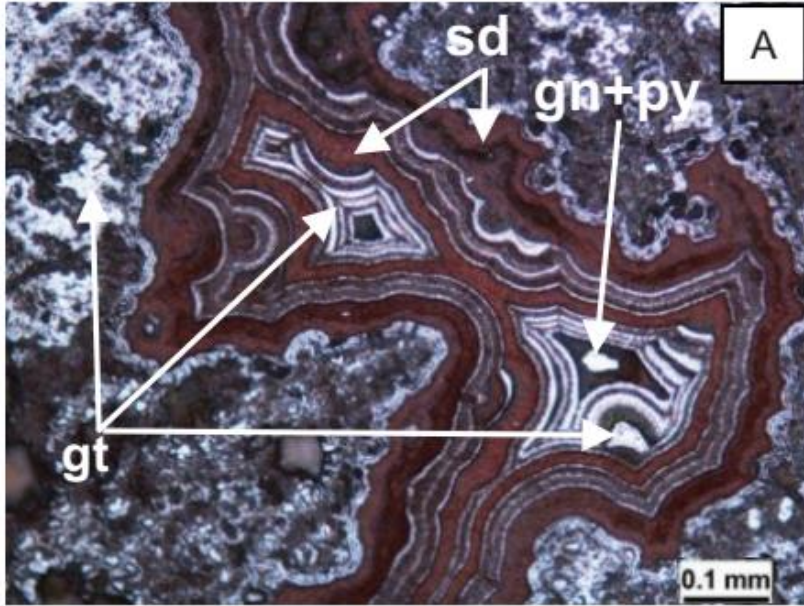
Modelo genético de dois estágios para a mineralização de Au de Las Cruces.

Estágio 1. Mobilização e fixação de metais preciosos durante o intemperismo do depósito maciço de sulfeto e desenvolvimento de gossan e perfil supergênico.

Estágio 2. Evolução posterior do perfil supergênico sob a cobertura sedimentar rica em carbonatos.

FIG. 9. Two-stage genetic model for the Las Cruces Au mineralization. Stage 1. Precious metals mobilization and fixation during weathering of the massive sulfide deposit and gossan and supergene profile development. Stage 2. Later supergene profile evolution beneath the carbonate-rich sedimentary cover. See text for explanation.

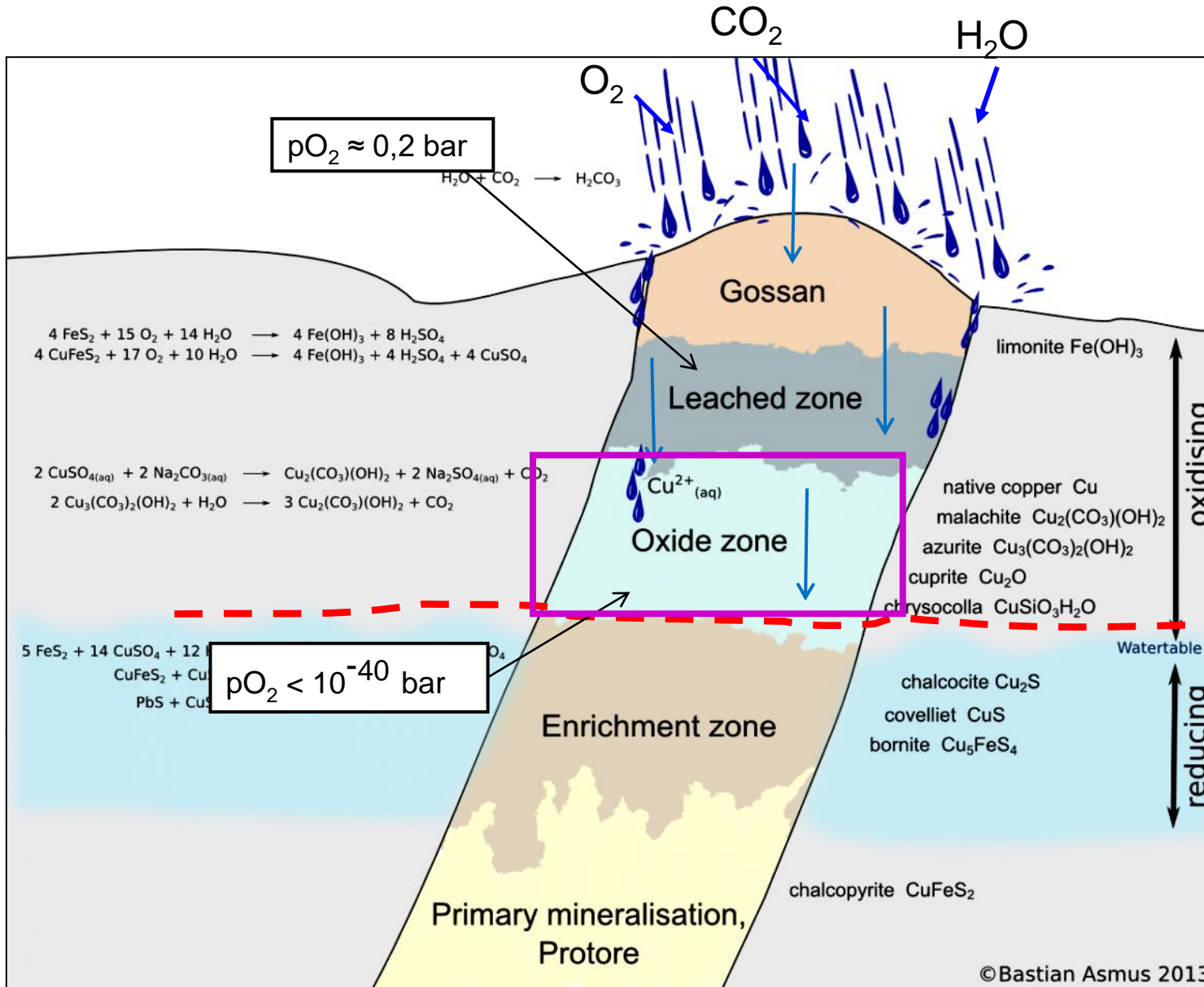
Gossan



Imagens de microscopia de luz refletida do depósito supérgeno Au de Las Cruces (Gossan)

(A) Textura de micro-bandas de siderita (sd) e goethita (gt) alternadas, com galena (gn) e pirita (py) preenchendo vazios; (B) aparência microscópica da fração <53 frações de concentrados pesados; (D) Grãos de Au livres de forma lobular; (E) Cristais de Au (Au) alongados associados a galena esquelética (gn);

Perfil de Alteração Supérgena: Zona de Oxidação



Zona de Oxidação:
 mineralização
 supérgena: oxiânions
 (óxidos, hidróxidos,
 carbonatos, silicatos,
 vanadatos, fosfatos,
 etc)

SLF

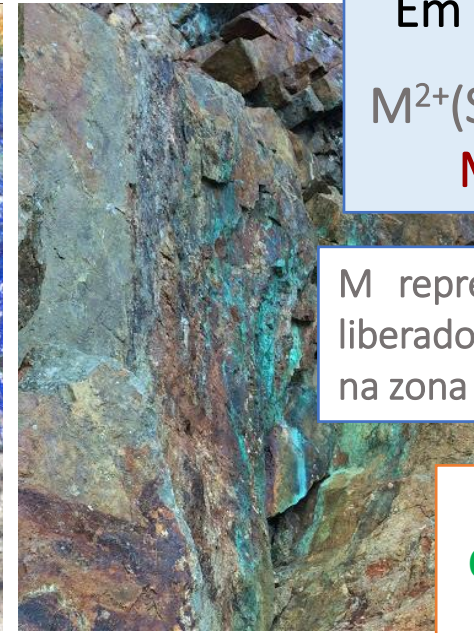
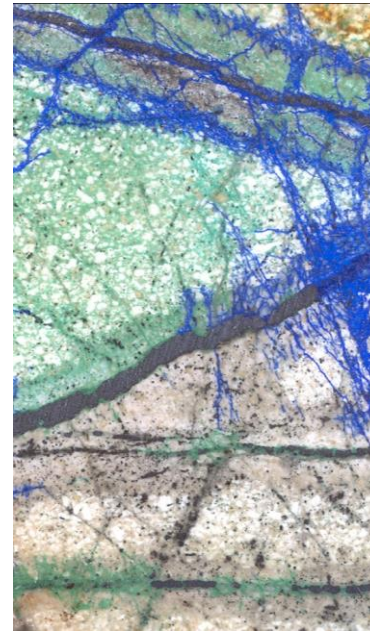
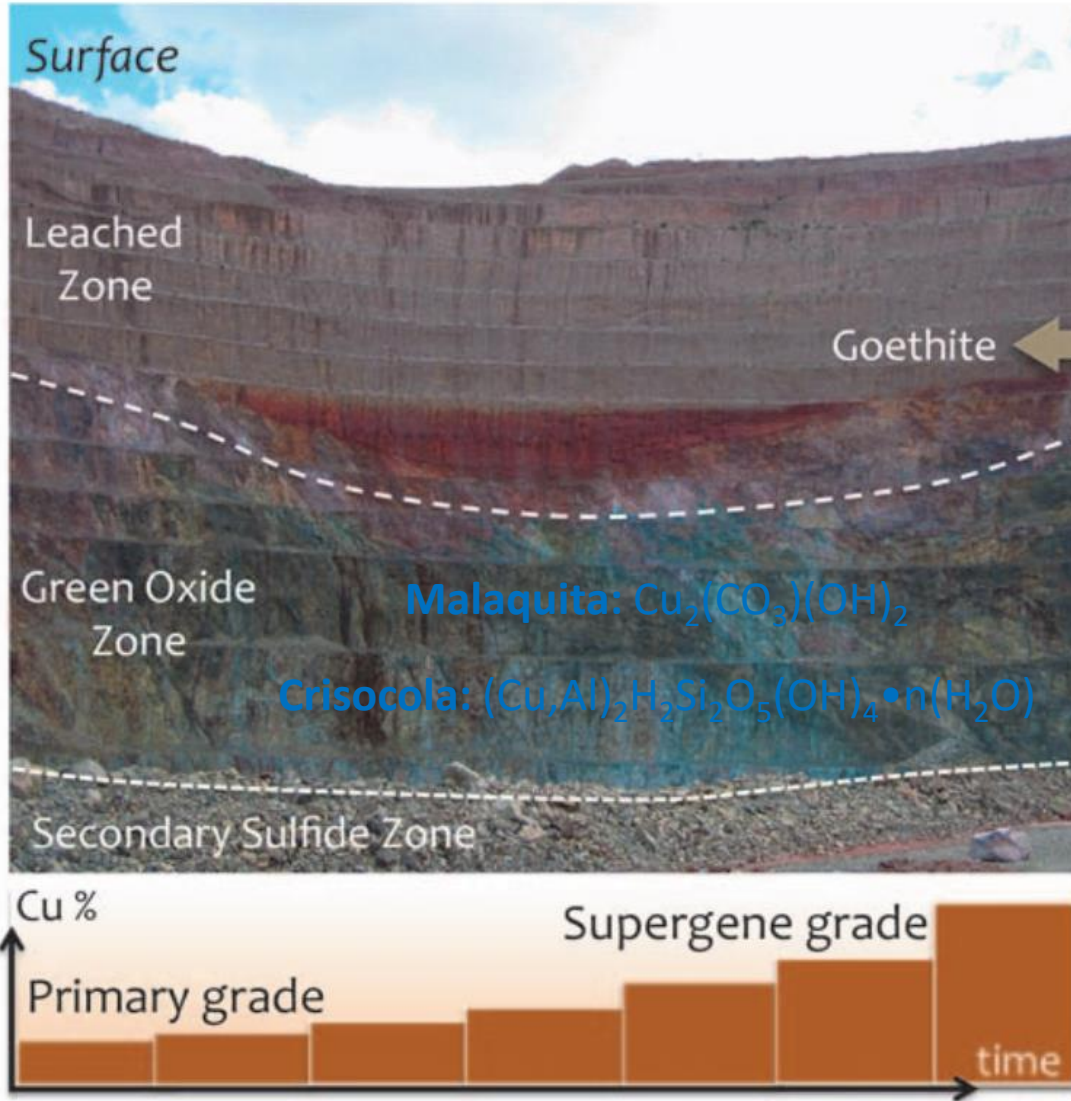
**Zona de saturação ou
 de enriquecimento**

Sulfeto primário

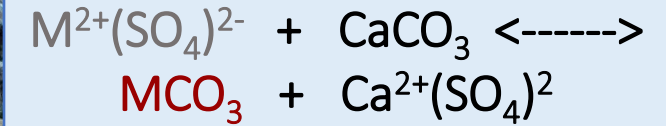
• Imagem de: <http://en.archaeometallurgie.de/gossan-iron-cap/>

Zona de Oxidação

("Green oxide zone")



Em meio neutro a alcalino:



M representa o metal previamente liberado por dissolução de seu sulfeto na zona de oxidação)

Minerais mais comuns:

Cobre: malaquita, azurita, crisocola

Ferro: goethita, hematita

Chumbo: anglesita, cerussita

Manganês: pirolusita, rodocrosita

Níquel: gaspeita, garnierita

Prata: prata nativa, clorargirita

Zinco: smithsonita, hemimorfita, zincita



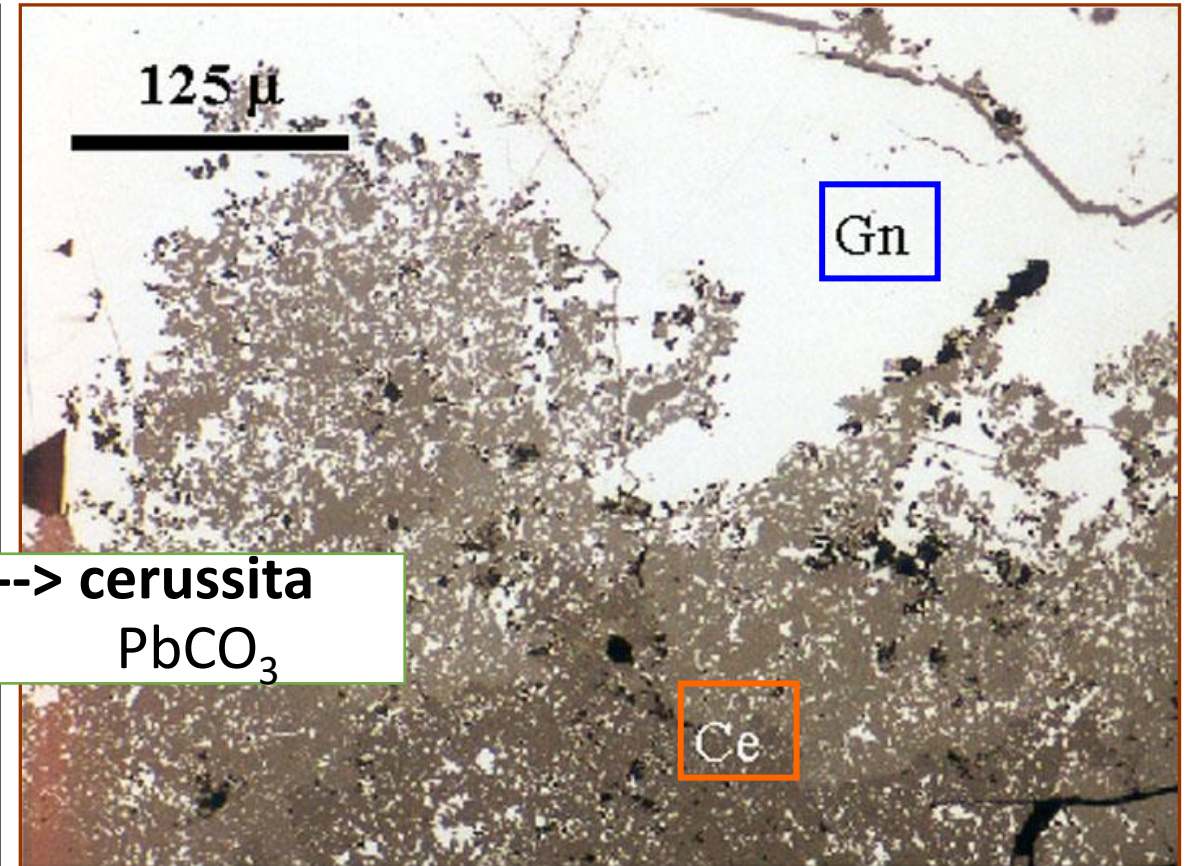
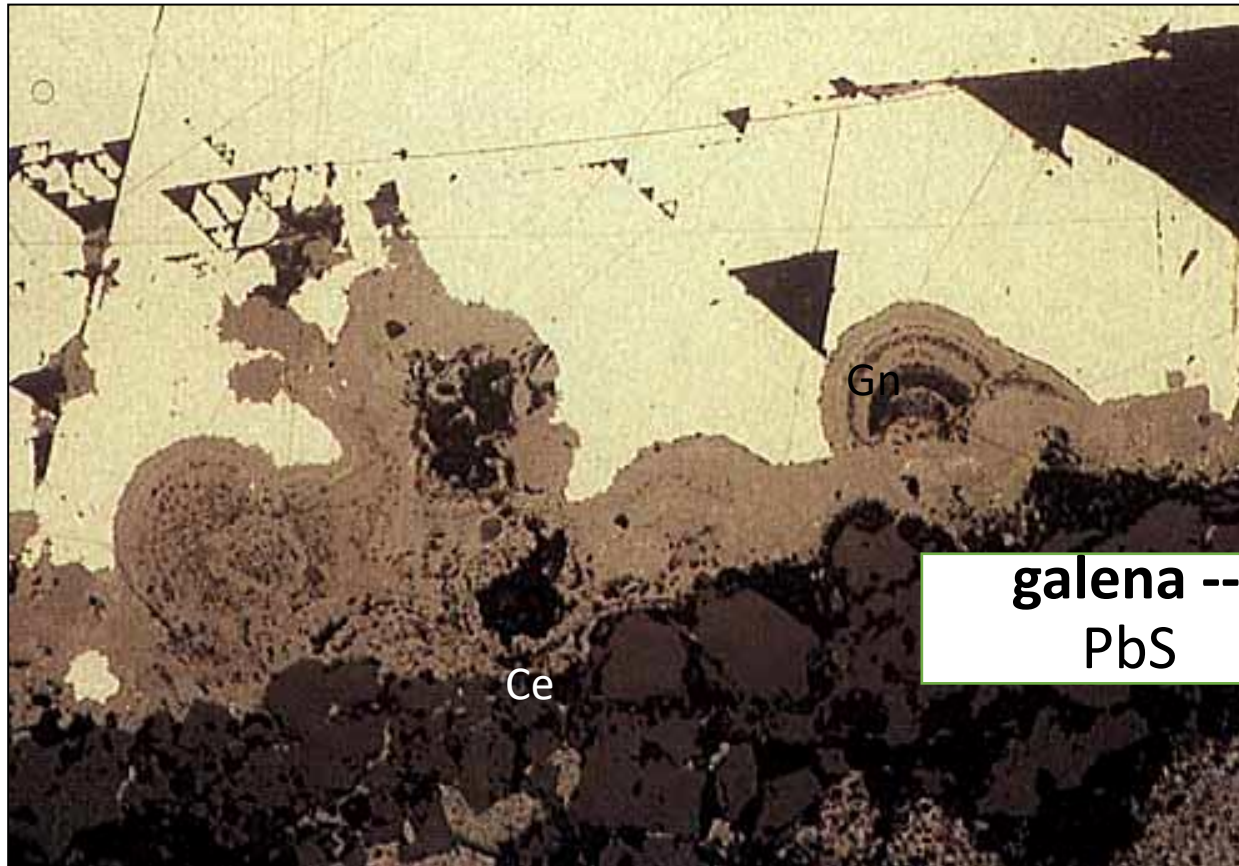
Deposição de metais na zona de oxidação

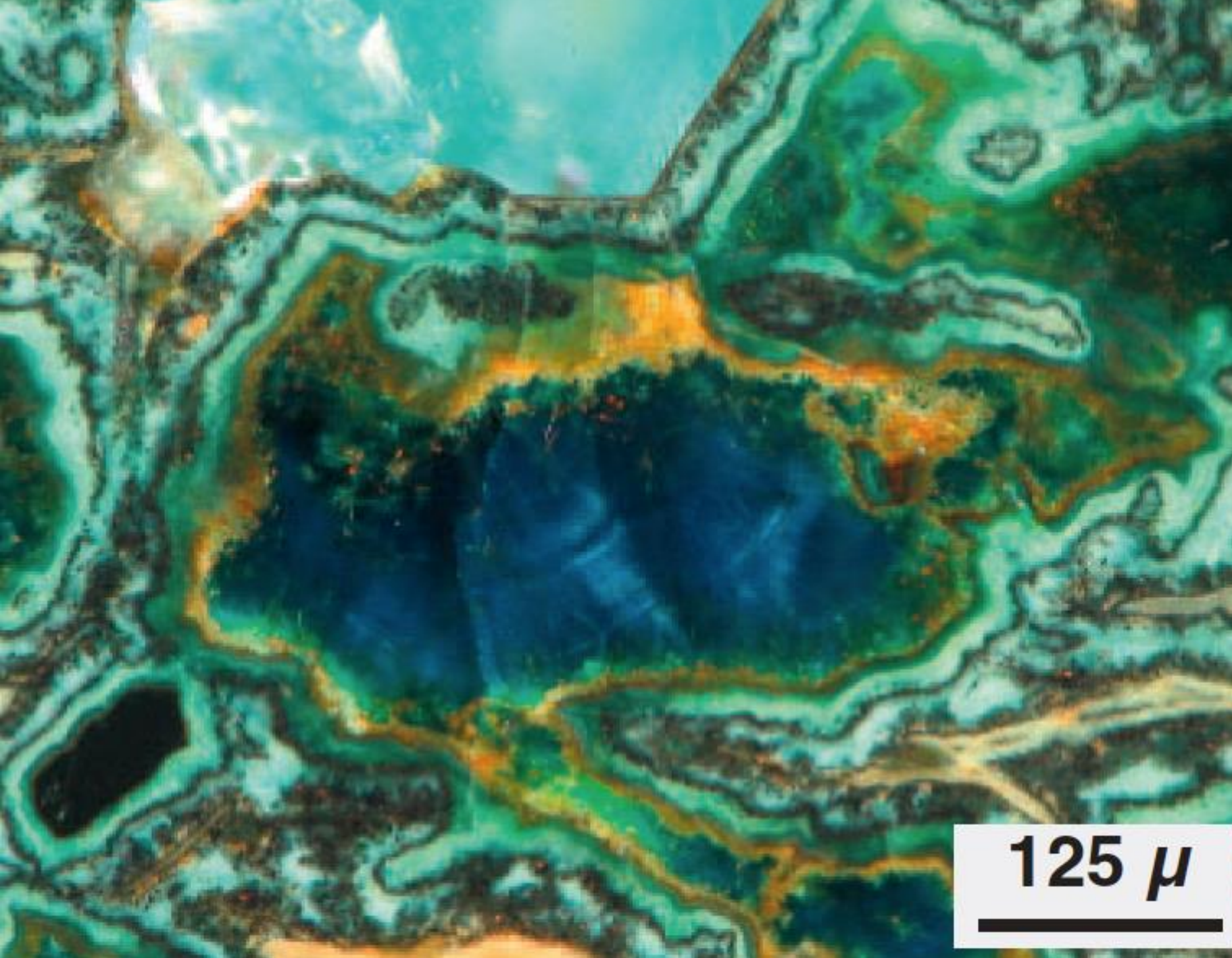
Minerais secundários de metais de baixa solubilidade (Pb e Ag).

Presença de rochas e minerais reativos (Cu e Zn).

podem formar depósitos com teores mais elevados que os da mineralização primária.

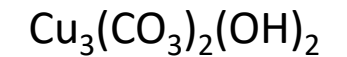
(redução de volume na zona de oxidação e (acumulação relativa e acumulação absoluta))



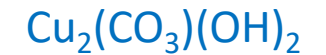


AZURITA E MALAQUITA (CARBONATOS DE COBRE)

Azurita



Malaquita:



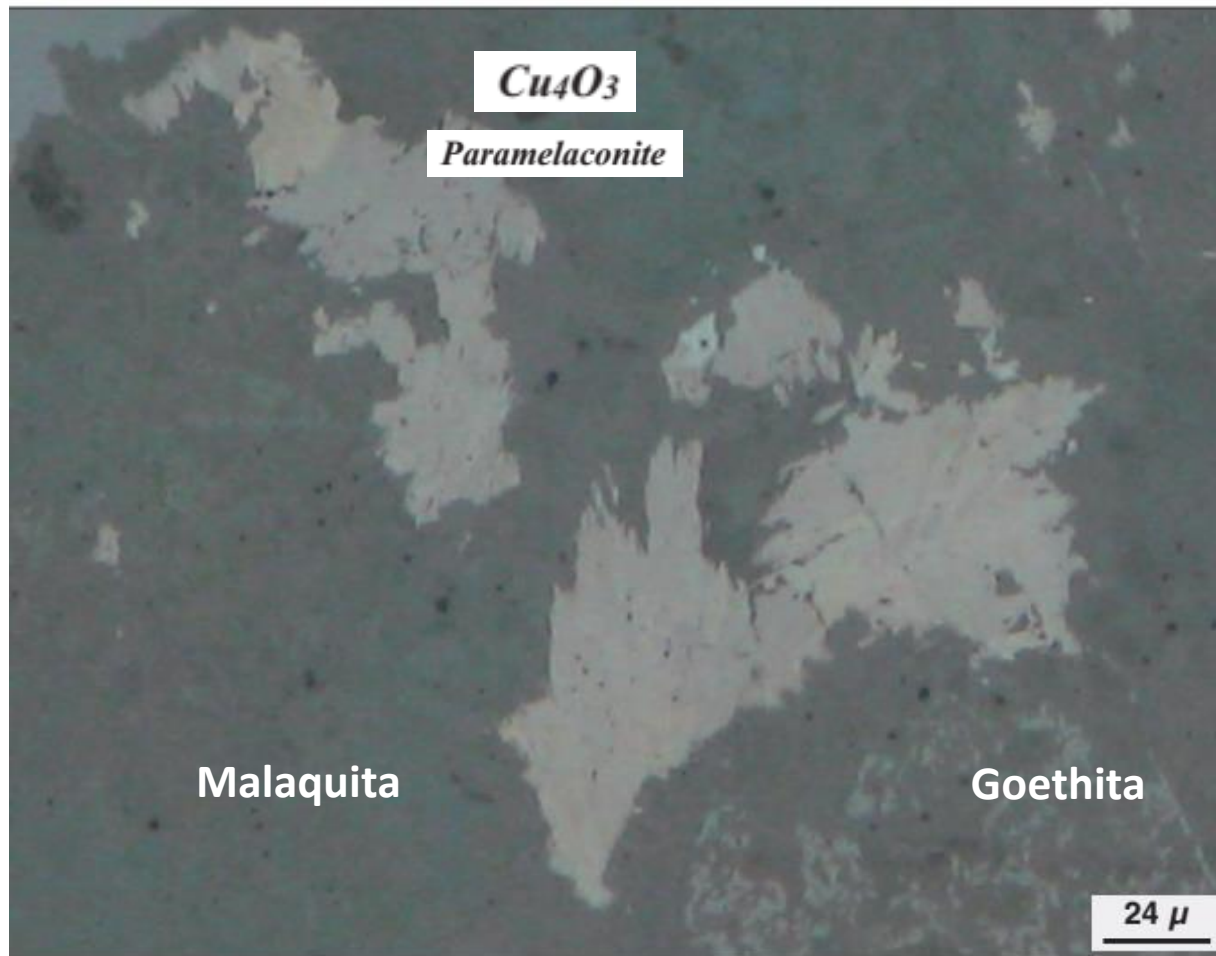
Azurita radial (reflexões internas azuis), **malaquita** (reflexões internas verdes), **goethita** (reflexão interna marrom), outros carbonatos (transparentes); Neubulach, Schwarzwald, Alemanha;

Luz Refletida; Nic. +

125 μ

Pracejus (2008)

Zona de Oxidação

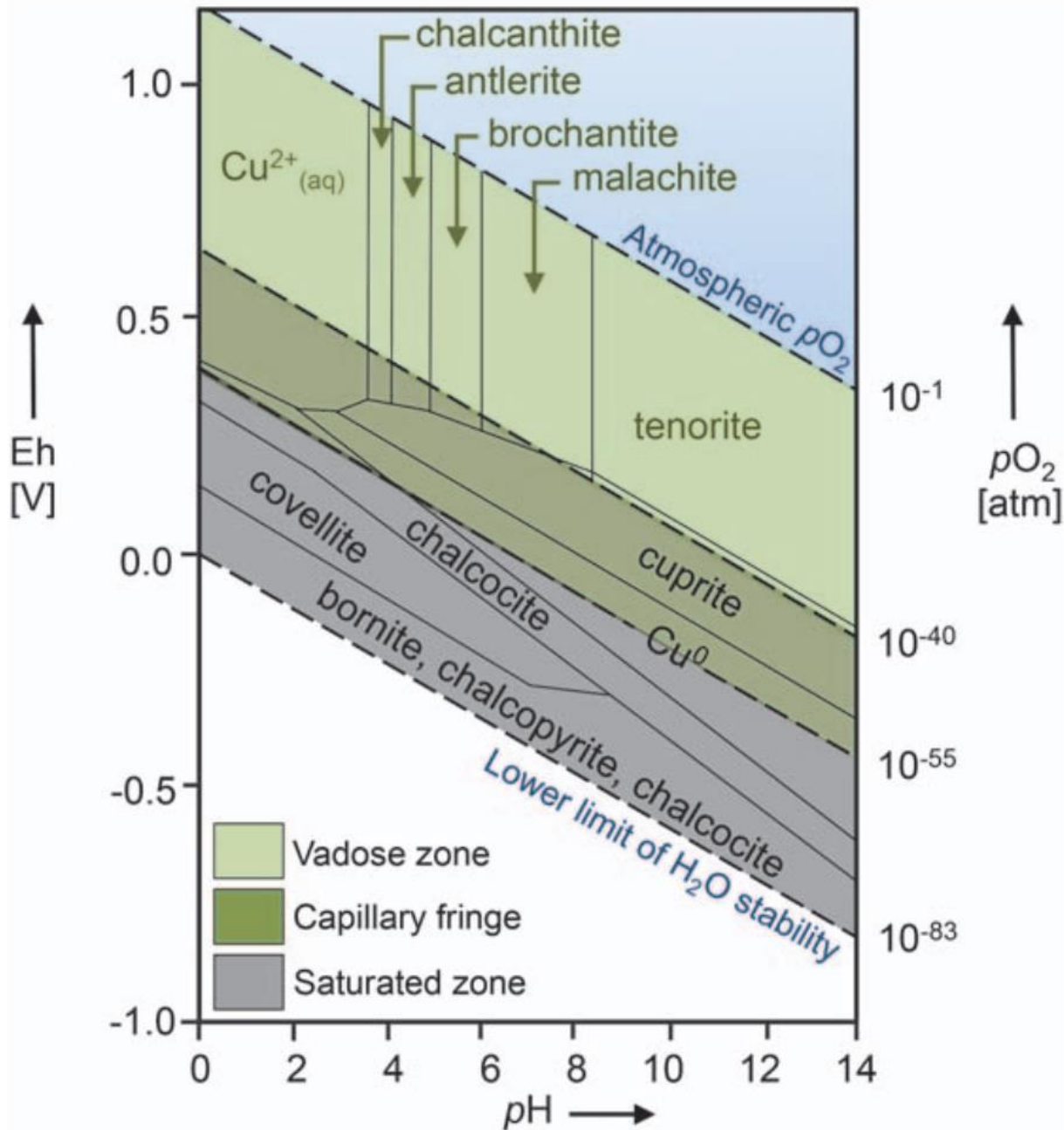


Cristais de paramelaconita radiados (pleocroísmo marrom a cinza, birrefletância) em malaquita (cinza acastanhado com tonalidade esverdeada ocasional, birrefletância), goethita (cinza azulado); Nic. //



Paramelaconita (anisotropia marrom-escura a azul), malaquita (reflexos internos verdes), goethita (reflexos internos castanhos); Burra Burra Mine, MT. Lofty Ranges, South Australia, Austrália; Nic. +

Minerais de cobre na zona de oxidação e de saturação



Calcantita - $CuSO_4 \cdot 5(H_2O)$

Antlerita - $Cu_3(SO_4)(OH)_4$

Brochantita - $Cu_4(SO_4)(OH)_6$

Malaquita - $Cu_2(CO_3)(OH)_2$

Tenorita - CuO

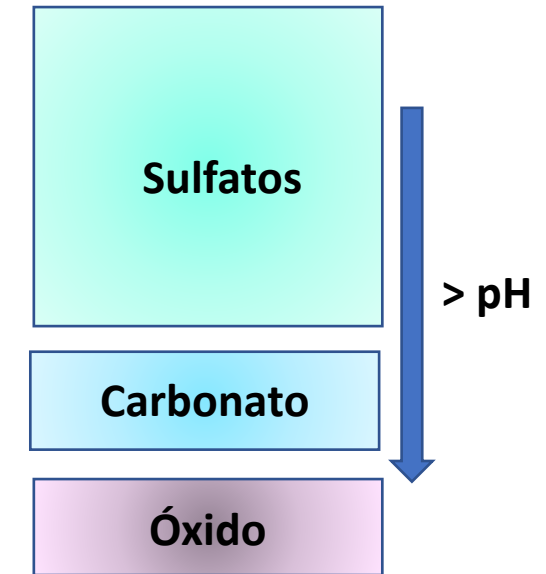
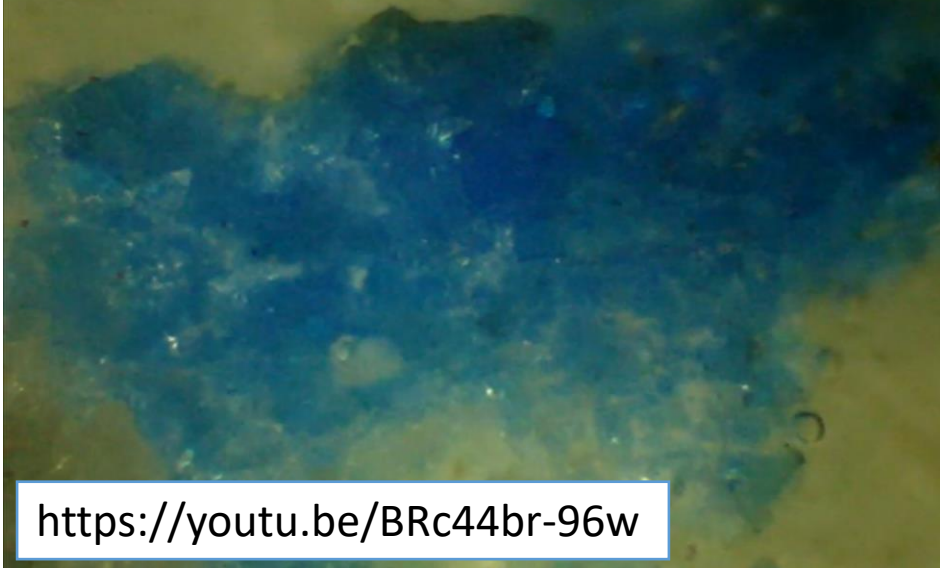


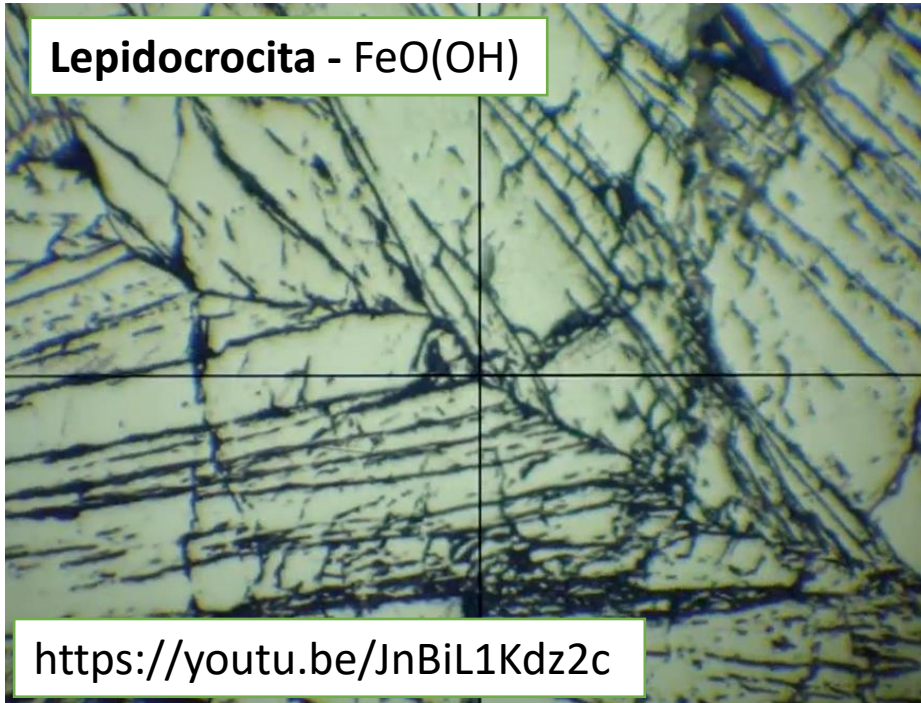
Gráfico de condições redox (Eh) versus pH, mostrando a estabilidade de espécies dissolvidas de cobre e minerais de cobre no ambiente supérgeno (Sillitoe, 2005 em Reich & Vasconcelos (2015)).

Linarita - $\text{PbCu}(\text{SO}_4)(\text{OH})_2$



<https://youtu.be/BRc44br-96w>

Lepidocrocita - $\text{FeO}(\text{OH})$



<https://youtu.be/JnBiL1Kdz2c>

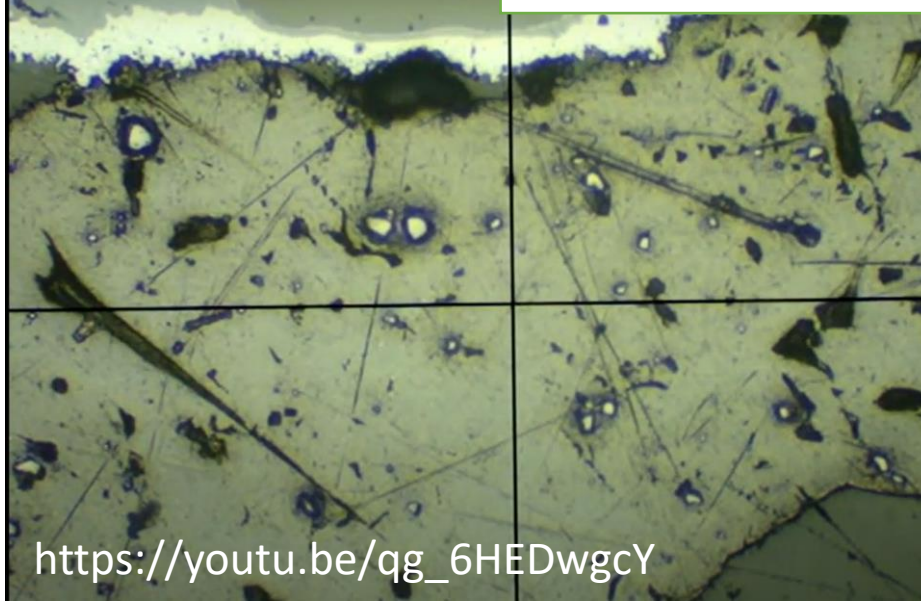
Brochantita - $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$



<https://youtu.be/RPa0a8GWhJk>

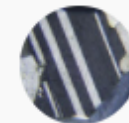
Luz Refletida - Nicóis Descruzados

Chlorargyrita - AgCl



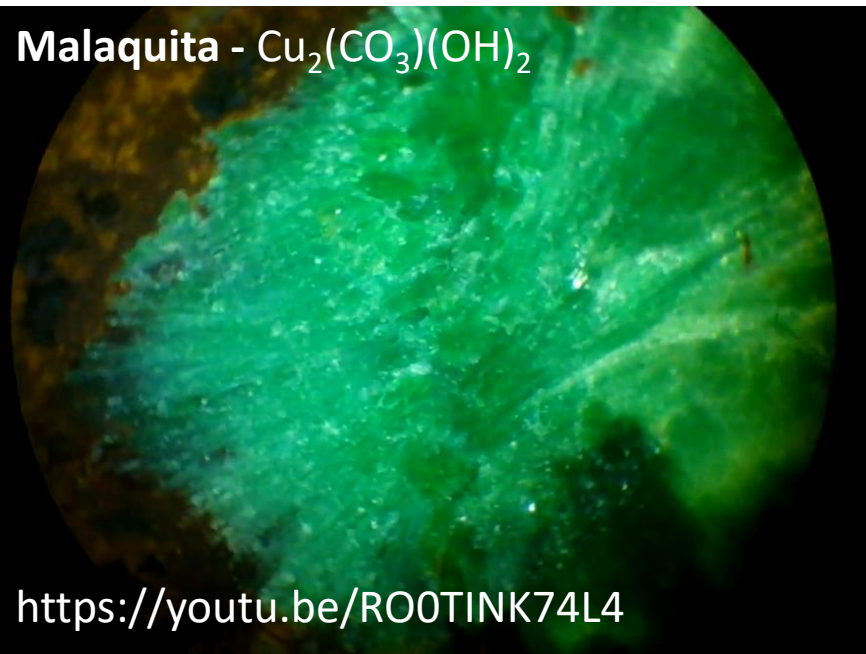
https://youtu.be/qg_6HEDwgcY

Sugestão de vídeos



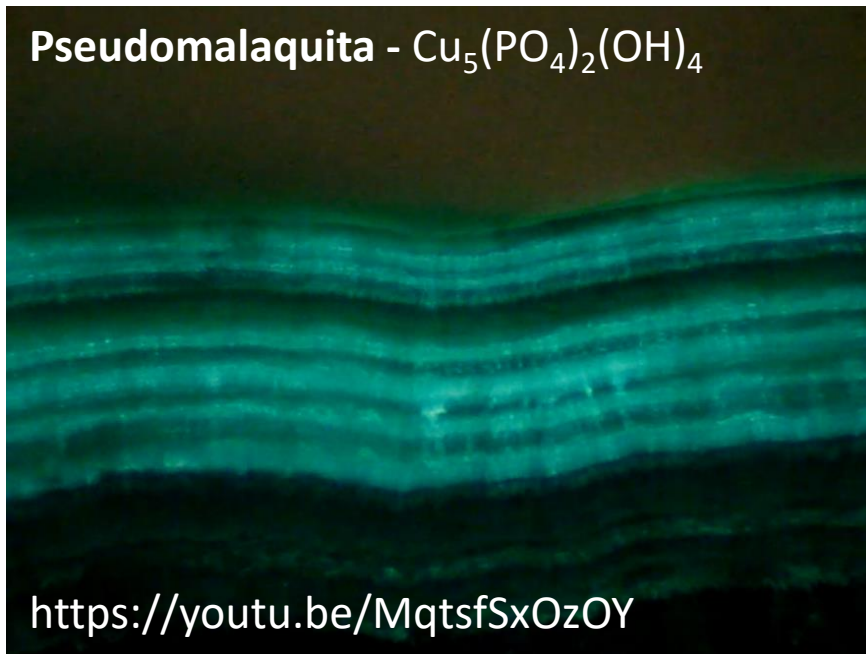
Heinrich Frank
6,54 mil inscritos

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



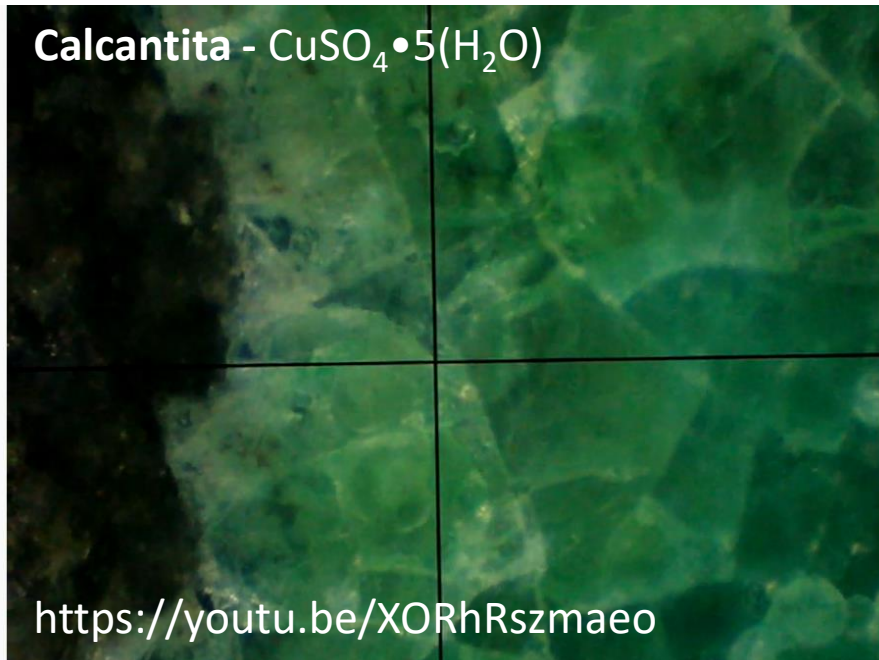
<https://youtu.be/ROOTINK74L4>

Pseudomalaquita - $\text{Cu}_5(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4$



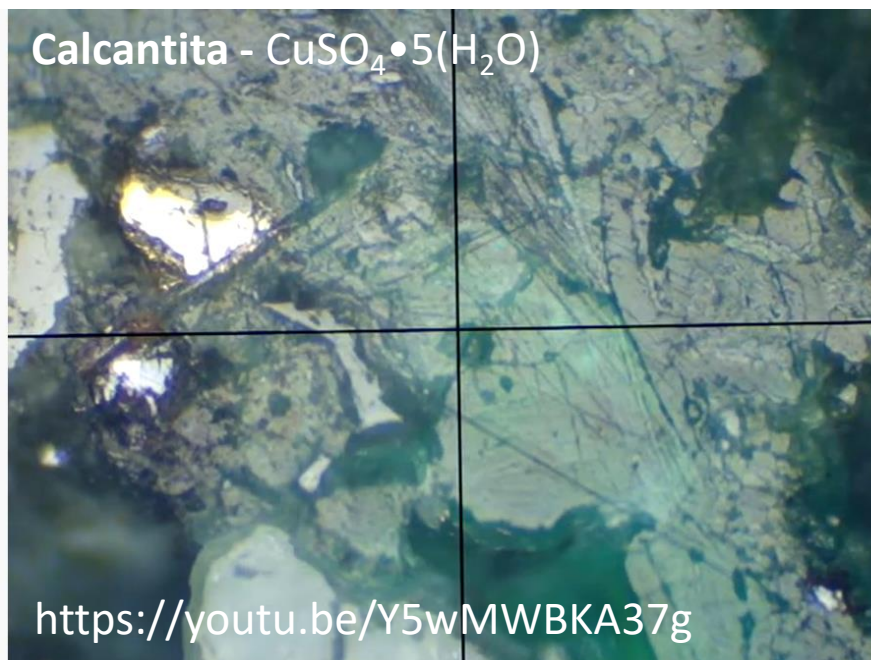
<https://youtu.be/MqtsfSxOzOY>

Calcantita - $\text{CuSO}_4 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$



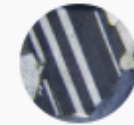
<https://youtu.be/XORhRszmaeo>

Calcantita - $\text{CuSO}_4 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$



<https://youtu.be/Y5wMWBKA37g>

Sugestão de vídeos



Heinrich Frank
6,54 mil inscritos

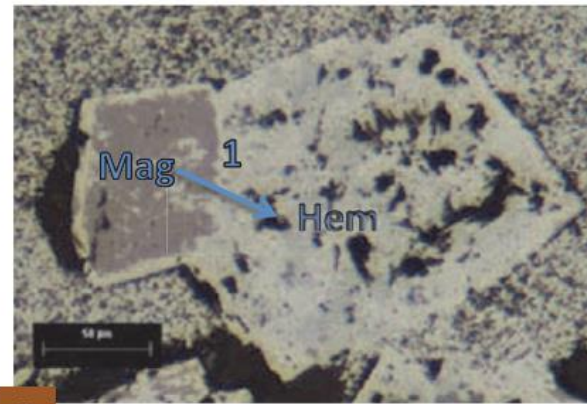
The Paleoclimatic Signatures of Supergene Metal Deposits

Paulo M. Vasconcelos¹, Martin Reich^{2,3}, and David L. Shuster^{4,5}

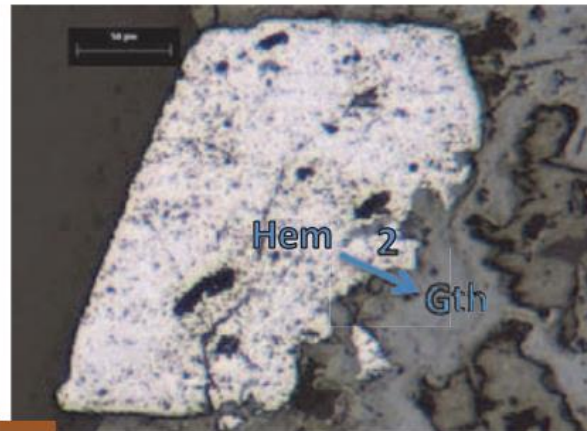
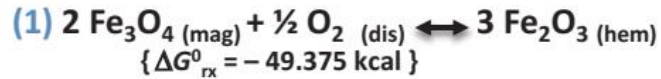
1811-5209/15/0011-0317\$2.50 DOI: 10.2113/gselements.11.5.317

Minerais encontrados depósitos de minério supérgenos que informam sobre condições geoquímicas (e paleoclimáticas):

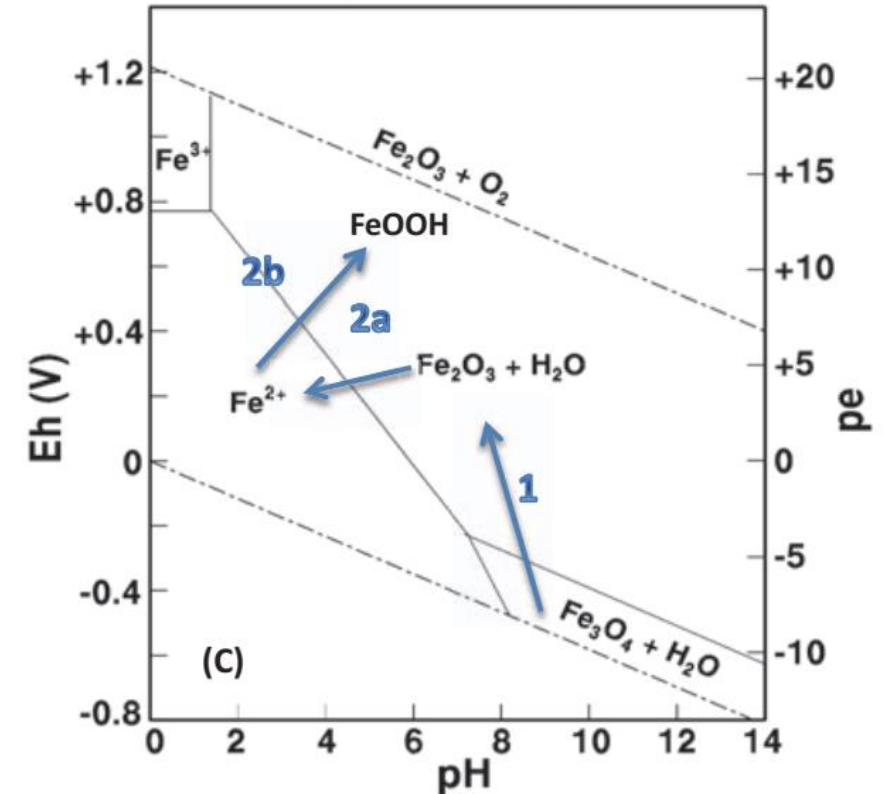
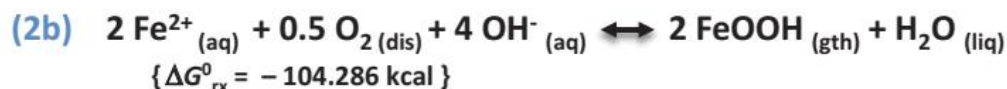
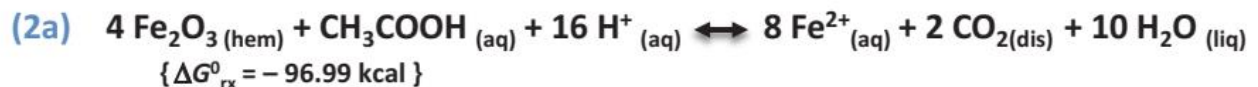
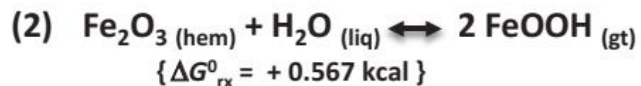
- (1) **Oxidação da magnetita (Mag) para hematita** ocorre na na zona de oxidação (aumento de Eh) – seta reação (1) ;
- (2) **Hidratação da magnetita ou hematita para goethita (Gth):** primeiro, hematita é dissolvida formando Fe²⁺ solúvel por ácidos carboxílicos, seguido pelo subsequente reoxidação de Fe²⁺ por O₂ dissolvido em soluções de intemperismo.



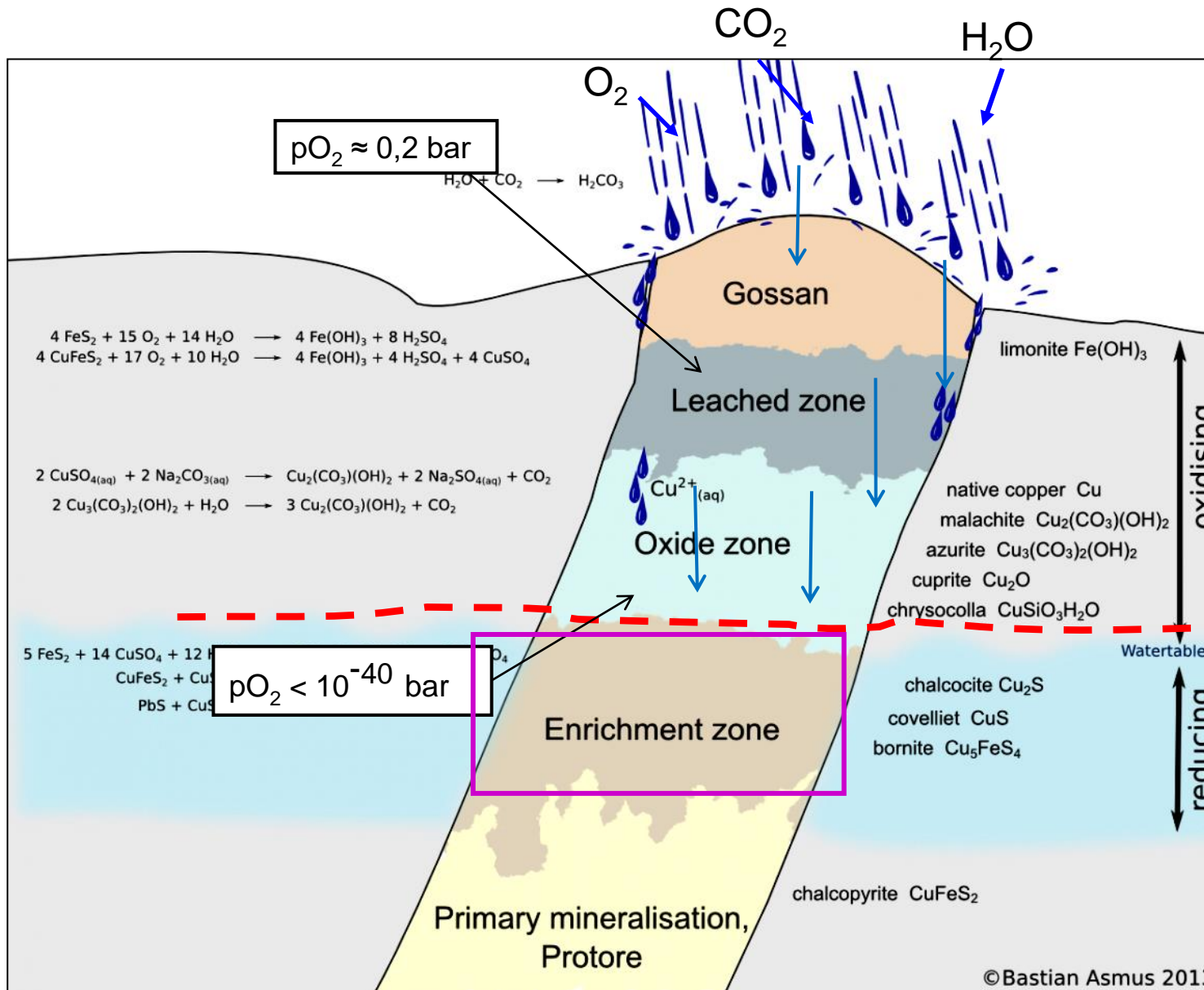
A Oxidation of magnetite



B Hydration of hematite



Perfil de Alteração Supérgena: Zona de Enriquecimento (Saturação)



Zona de enriquecimento:
Sulfetos supérgenos

Zona de
oxidação

SLF

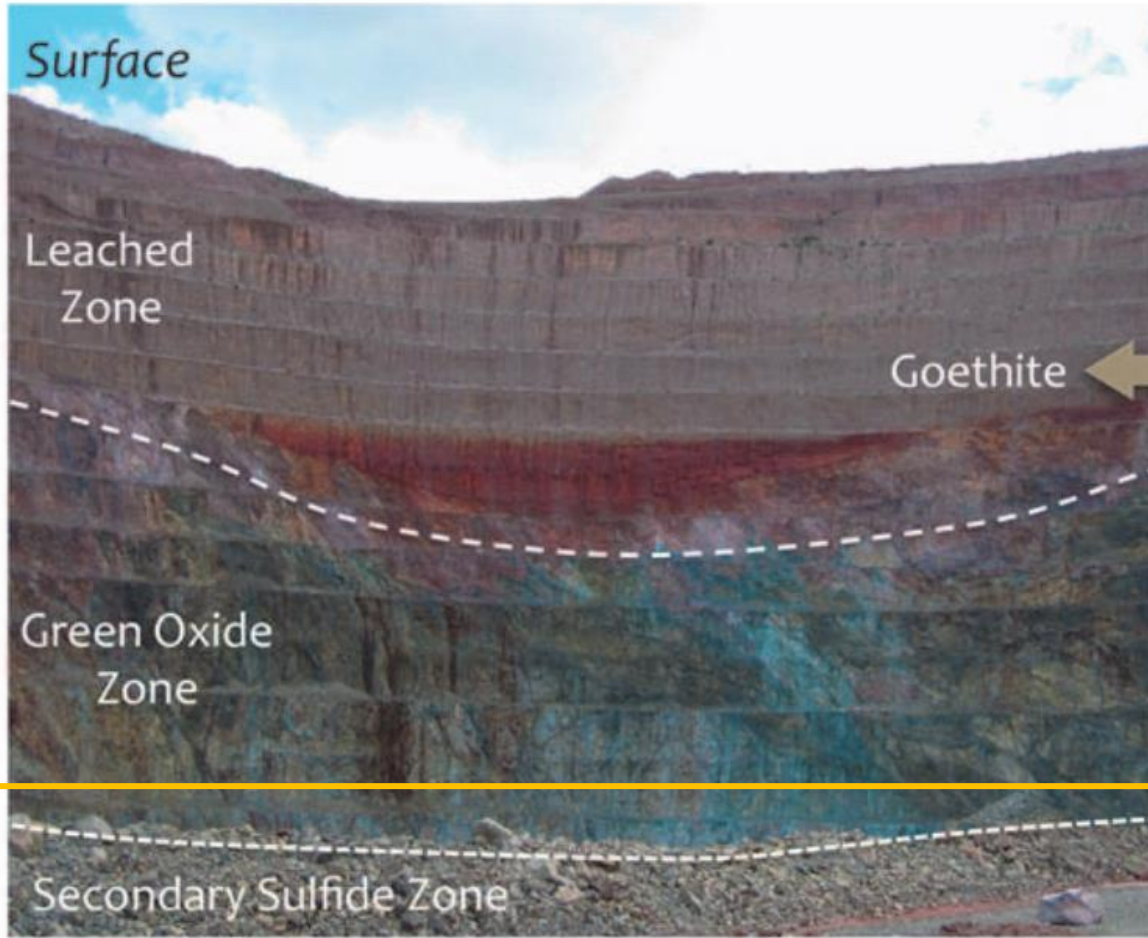
Zona de
enriquecimento

Sulfeto primário

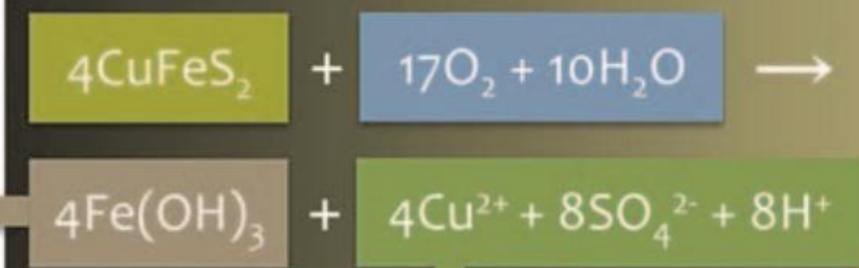
• Imagem de: <http://en.archaeometallurgie.de/gossan-iron-cap/>

Elements, 2015, 11 (5), p. 305-310

Perfil de Alteração Supérgena: Zona de Enriquecimento (Saturação)



Primary sulfide assemblage (chalcopyrite) is exposed to weathering agents and leached



Cu-rich solutions form "green Cu minerals" under oxidizing conditions



Cu precipitates as secondary sulfides under reducing conditions



Zona de Enriquecimento Supérgeno

Sulfetos supérgenos (ou secundários) mais comuns:

Cobre: calcocita, bornita

Chumbo: galena supergênica

Níquel: violarita

Prata: acantita, prata nativa

Zinco: esfalerita supergênica, wurtzite

Elevação do teor:

- ✓ **Acumulação absoluta** e, em parte, de **acumulação relativa** (e.g., argentita pré-existente + argentita supérgena;
- ✓ **Preservação aproximada do volume** (reações de substituição ou troca).

Série de Schürmann (1888): escala de afinidade pelo enxofre

Pd, Hg, **Ag**, **Cu**, Bi, Cd, Sb, Sn, **Pb**, Zn, Ni, Co, **Fe**, As, Tl, Mn

----- afinidade química decrescente pelo enxofre ----->

----- ≈ solubilidade crescente do sulfeto em água ----->

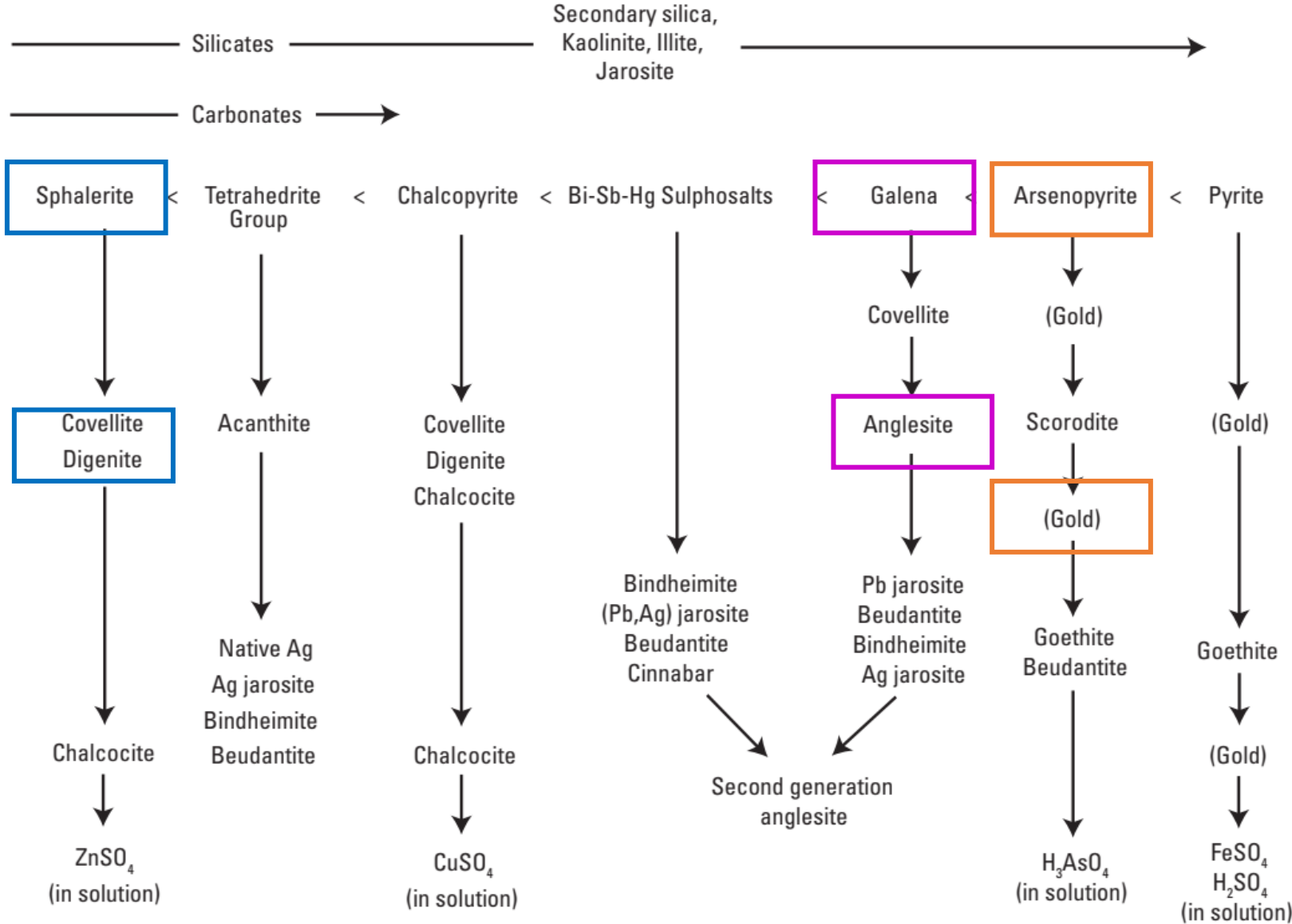
Ag substitui, por exemplo, Pb e Cu de seus sulfetos uma vez que estes metais têm menor afinidade que a Ag pelo enxofre.

mineral	Cu (%) ⁽¹⁾	Fe (%) ⁽¹⁾
calcopirita (CuFeS ₂)	34	30
bornita (Cu ₅ FeS ₄)	63	11
covelita (CuS)	66	-----
calcosita (Cu ₂ S)	79	-----

((1) – conteúdos aproximados no mineral)

Aumento de teor para Cu e Ag; raros exemplos para Pb e Zn.

Resistates: Cassiterite, Barite, Zircon, Rutile, Native Bismuth

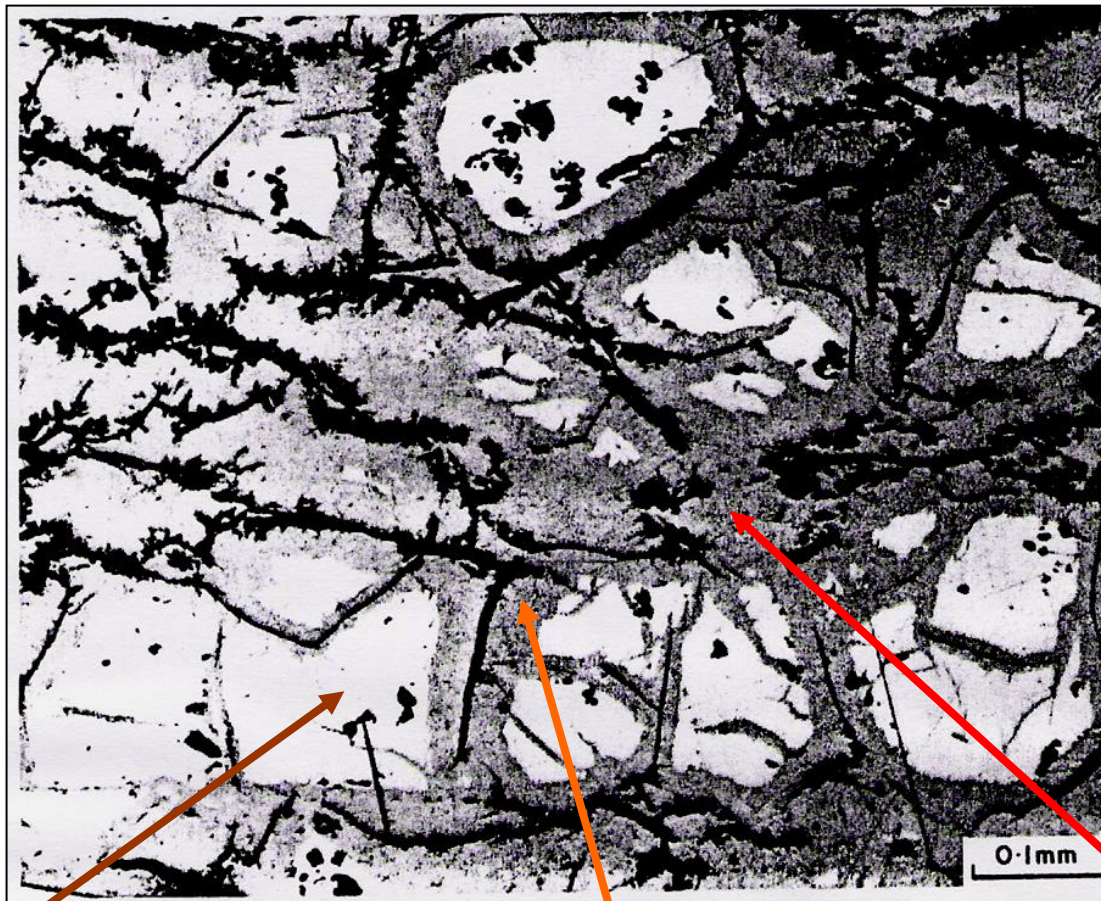


Sequência de mineralização supergênica formada a partir de depósitos de sulfeto maciços VMS de Bathurst (Boyle, 2003)

- ✓ As estabilidades dos sulfetos sob condições oxidantes, aumenta da esquerda para a direita;
- ✓ Os sulfetos primários à esquerda (especialmente calcopirita) são prontamente substituídos por sulfetos de cobre secundários na zona de enriquecimento;
- ✓ A precipitação de ouro durante a oxidação de arsenopirita e pirita também é indicadas.

<https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/c/Chapter12SIR10-5070-C-3.pdf>

Geração da estrutura celular ou *boxwork* na zona de saturação



Cu²⁺

CuFeS₂ (calcopirita) -----> Cu₂S (calcosita)

Fe²⁺ -----> Fe³⁺

vênulas dendríticas de óxi-hidróxidos de ferro

DEPOSIÇÃO DE METAIS NA ZONA DE SATURAÇÃO

Reações de troca entre: **soluções sulfatadas** e os **sulfetos pré-existent**



A troca dos metais obedece basicamente:

O grau de calcofilia (afinidade química pelo enxofre dos metais envolvidos)

A menor solubilidade do sulfeto supérgeno neoformado.

Imagem de: *Handbook of stratabound and stratiform ore deposits* (K. H. Wolf, editor), 1985, Vol. 13, p. 261-390, fig. 50.

Texturas Secundárias Resultantes de Substituição

- Textura de Substituição resulta de:

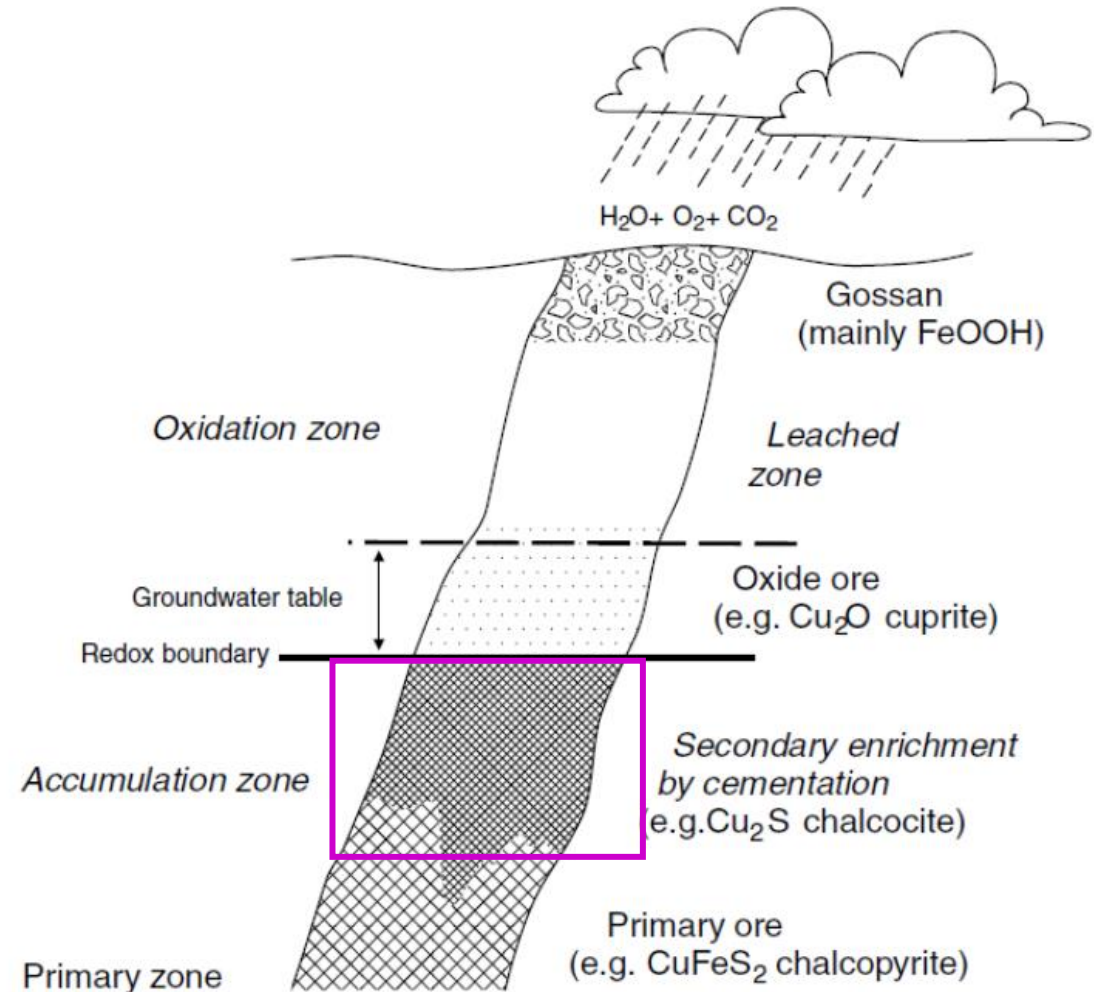
- (I) Dissolução e subsequente reprecipitação;
- (II) Oxidação;
- (III) Difusão em estado sólido.

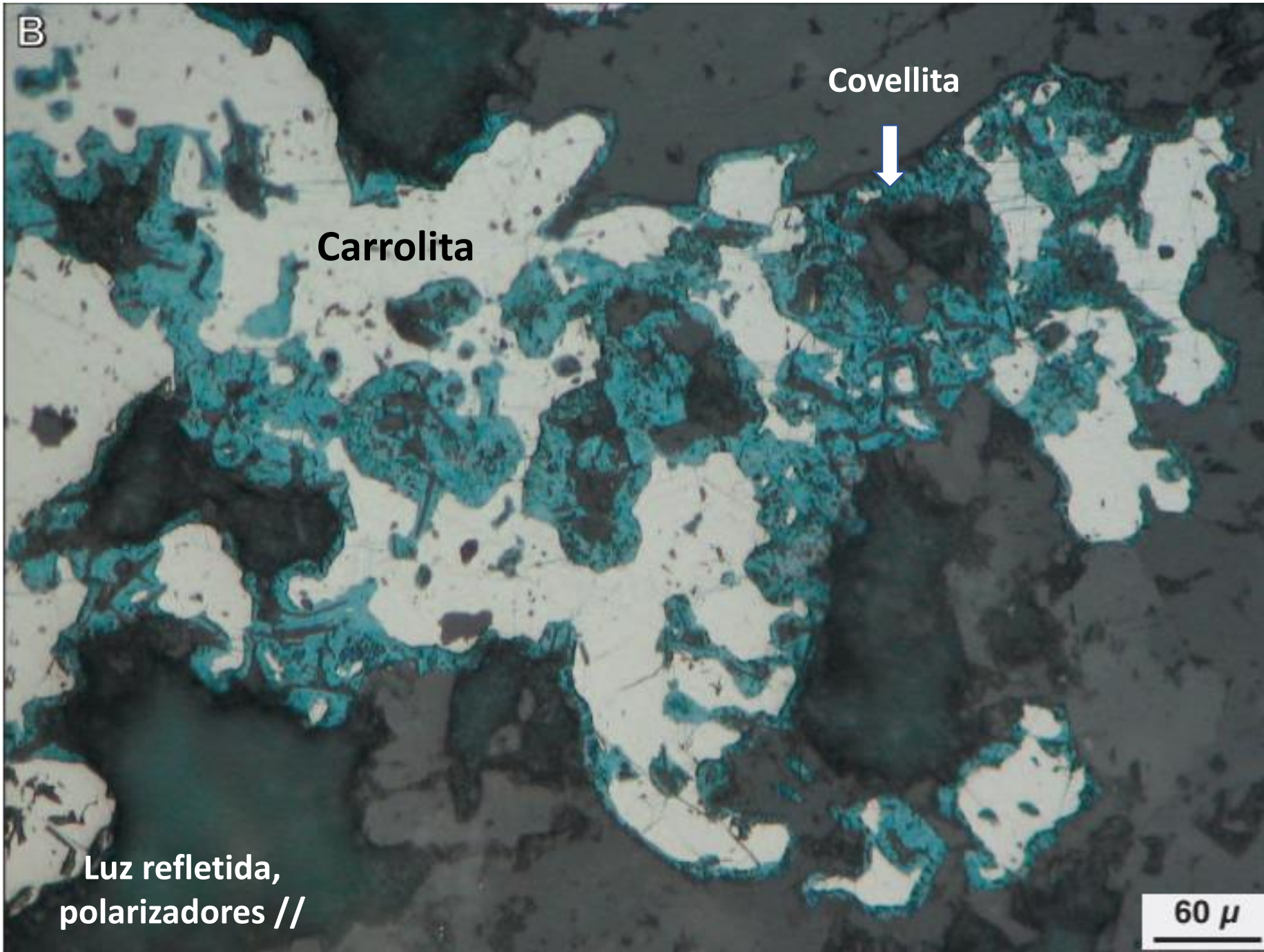
- Depende de:

- (I) **Superfície do cristal:** comumente a substituição ocorre nas suas bordas, canais internos, clivagens e fraturas;
- (II) **Composição química da fase inicial;**

Depósitos de Cu do tipo Pórfiro

Ciclos subsequentes de alteração supérgena podem lixiviar e enriquecer a zona de enriquecimento supérgeno formada anteriormente, produzindo massas de rocha com calcocita e óxido de cobre com teores significativamente maiores do que o minério primário





**Textura de
Substituição**

Estágio Inicial

Carrolita $Cu(Co,Ni)_2S_4$

Covellita CuS

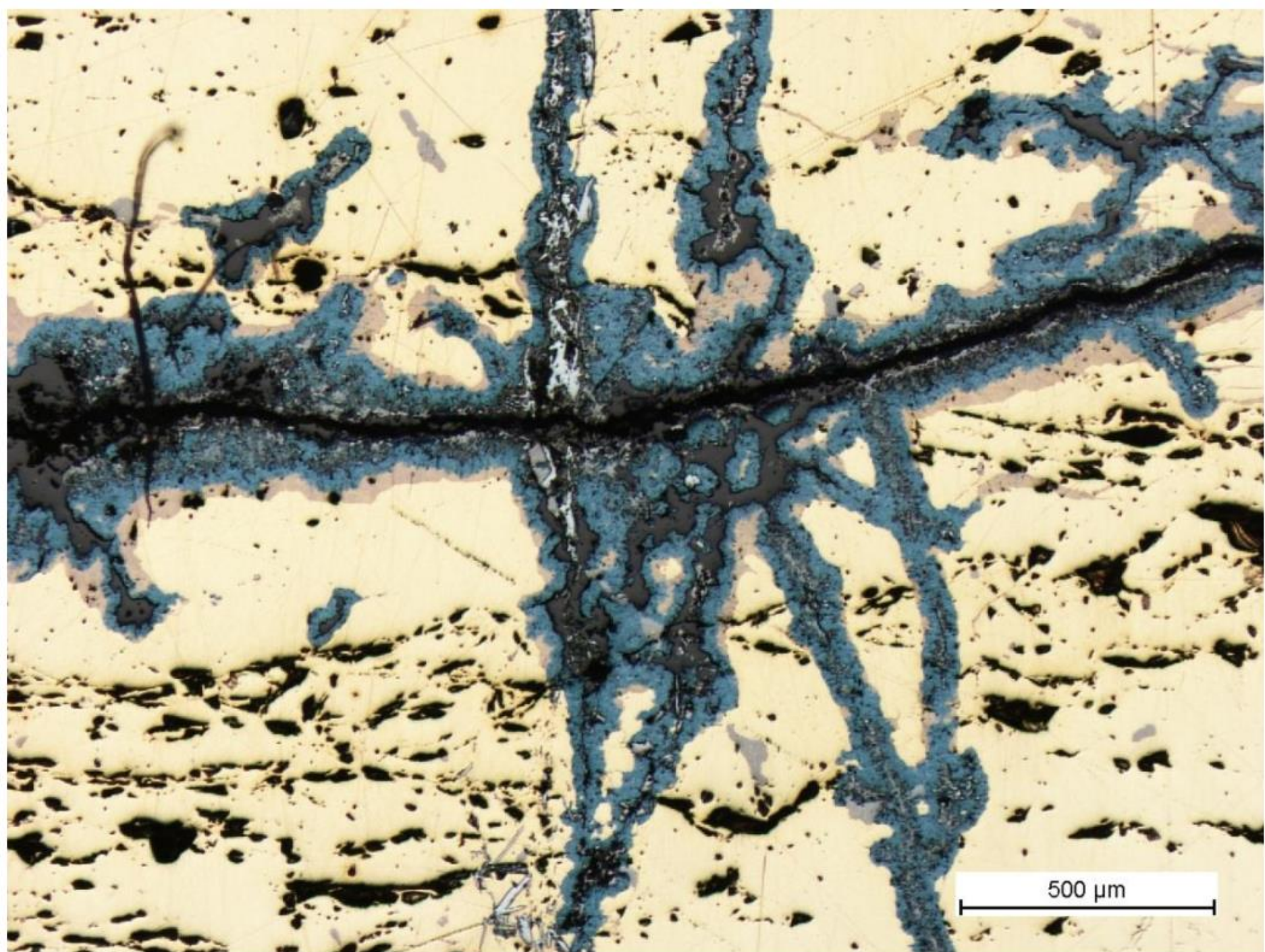
Carrolita anédrica (branco cremoso), substituída por covellita (azul); Mina de Kolwezi, Katanga, Congo; Nic. //

Pracejus (2008)

Covellita (azul profundo) e alguma **bornita** marrom ocorre em fraturas E-W e N-S, cortando e substituindo **calcopirita** (amarela)

Luz refletida, polarizadores //

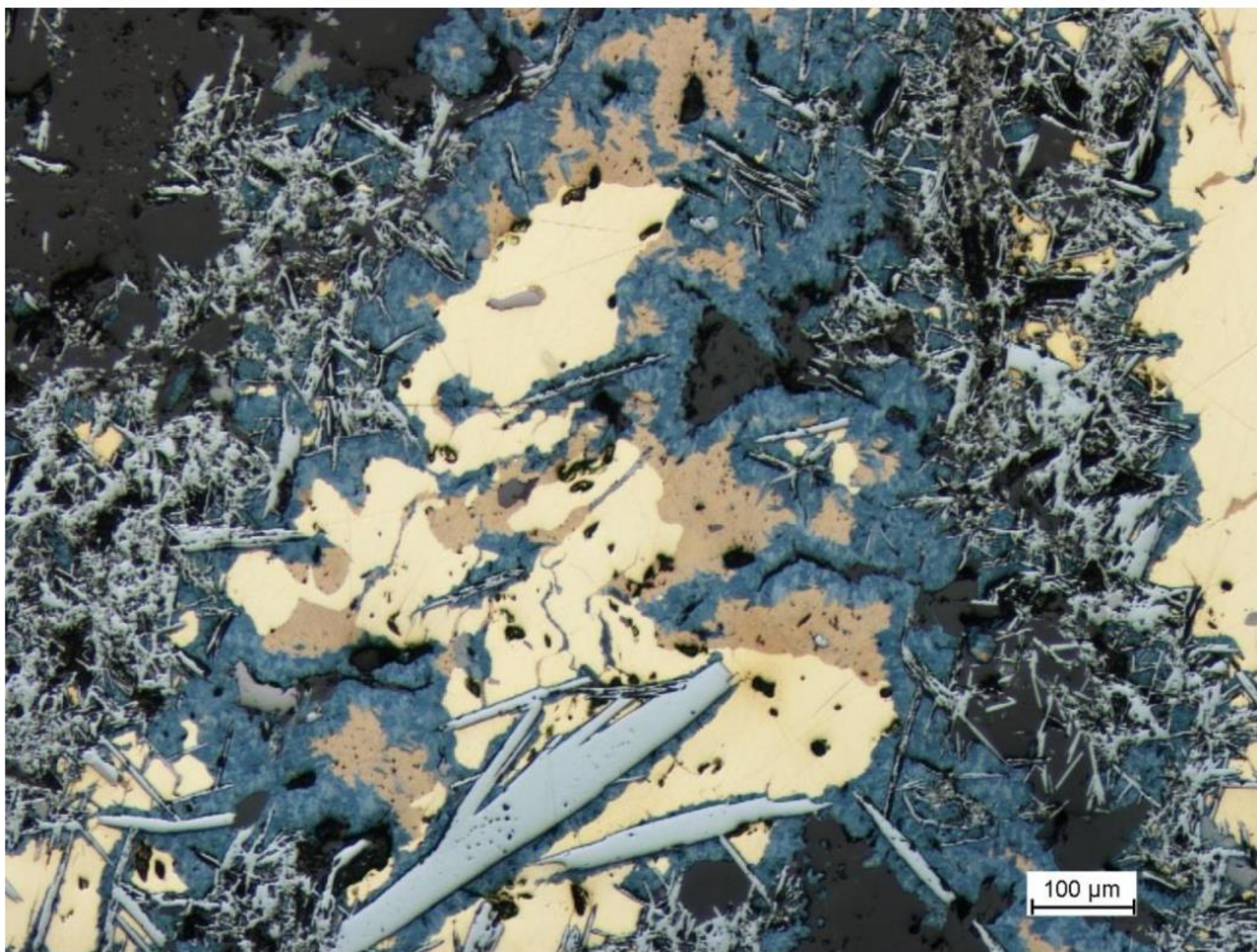
Anna Hjelström (2015)
Copper minerals under the microscope. Uppsala University.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:785865/FULLTEXT02>



Cristais de **hematita** placoide cinza azulado. No centro e na extrema direita há **calcopirita** amarela substituída por **bornita** (marrom) e **covellita** (azul profundo)

**Luz refletida,
polarizadores //**

Anna Hjeltström (2015)
Copper minerals under
the microscope. Uppsala
University.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:785865/FULLTEXT02>



Substituição e cimentação em sulfetos – zona de enriquecimento (saturação)

Cobre tem maior
afinidade com S
do que o Fe, que
é substituído

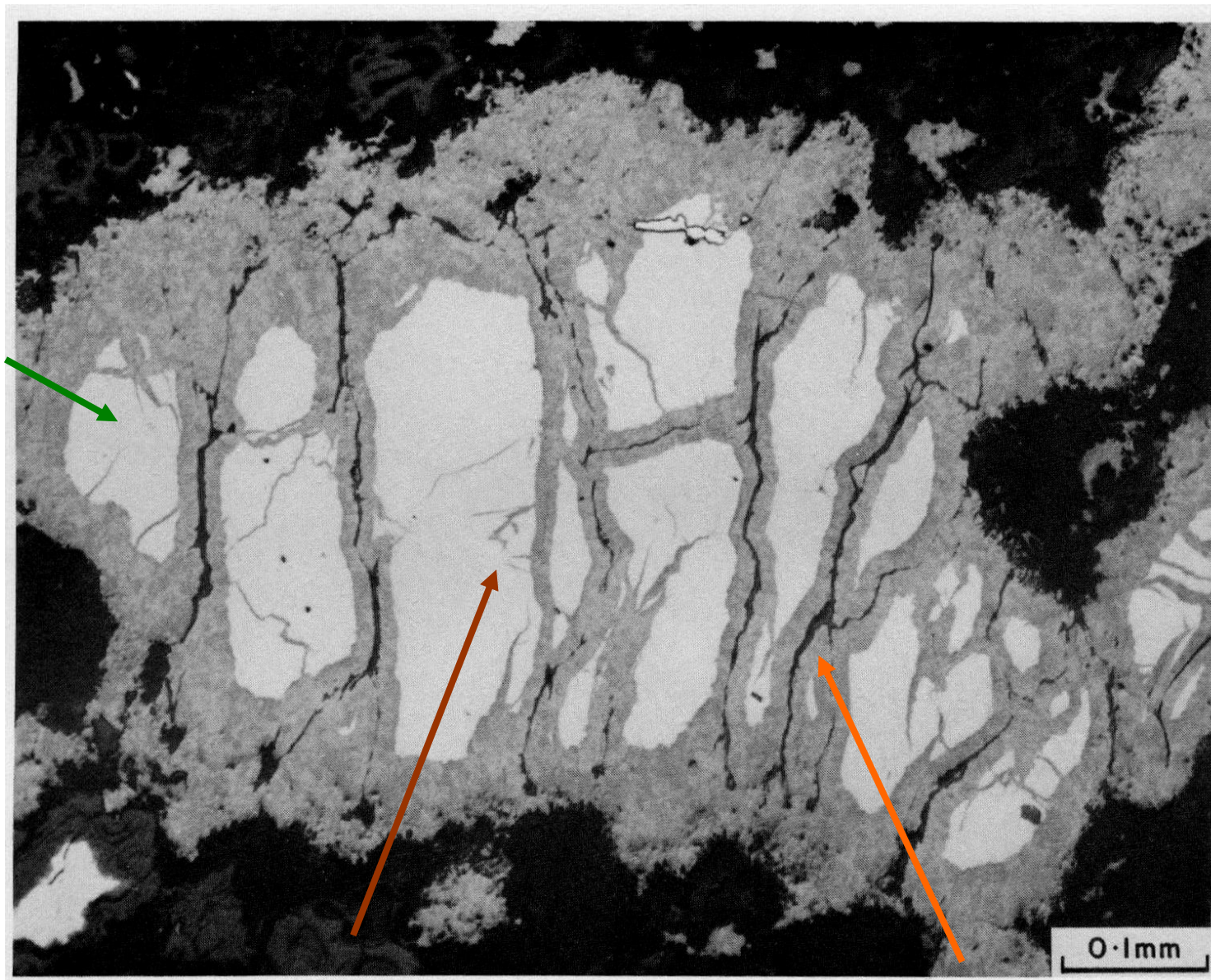


Imagem de: *Handbook of
stratabound and stratiform ore
deposits* (K. H. Wolf, editor), 1985,
Vol. 13, p. 261-390, figs. 50.

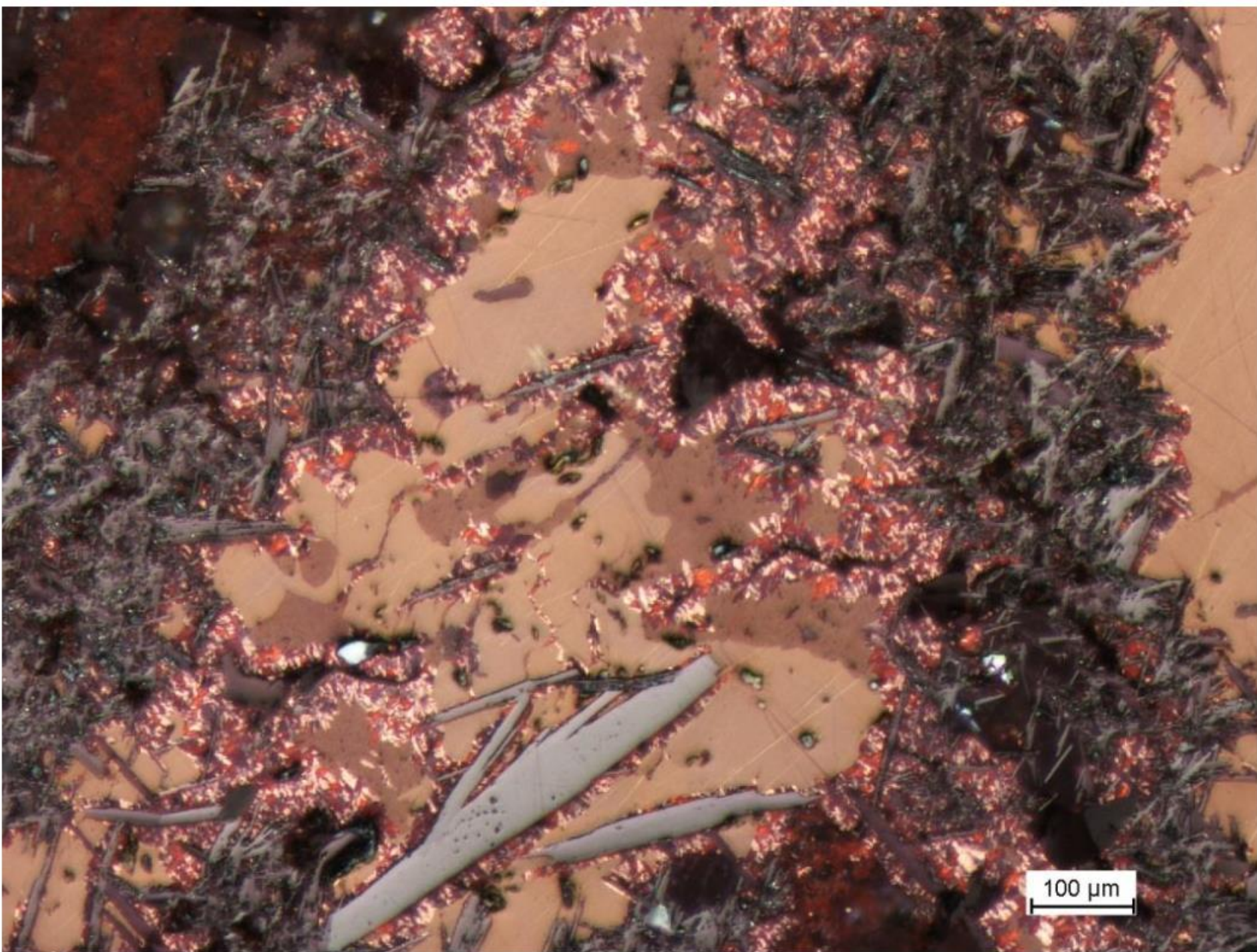
CuFeS_2 (calcopirita) -----> Cu_2S (calcosita)

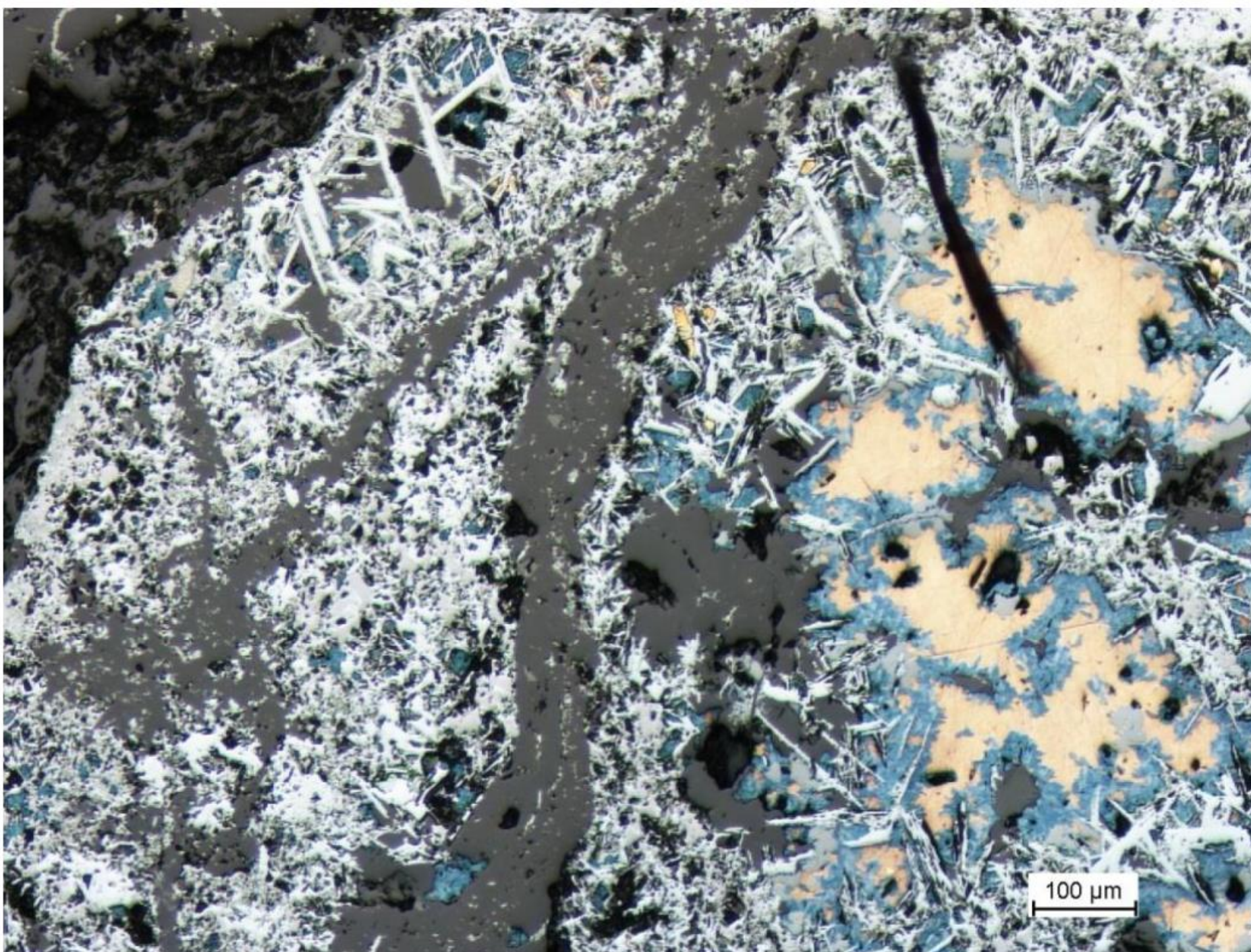


Covellita mostra cores
de anisotropia
brilhantes
características
(vermelho, laranja
e marrom)

**Luz refletida,
polarizadores #**

Anna Hjeltström (2015)
Copper minerals under
the microscope. Uppsala
University.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:785865/FULLTEXT02>





Cristais tabulares de **hematita** cinza azulada e uma faixa de goethita cinza escuro, orientada aproximadamente na direção N-S. À direita há **bornita** marrom-amarelado substituída por **covellita** (azul profundo)


**Luz refletida,
polarizadores //**

Anna Hjelström (2015)
Copper minerals under
the microscope. Uppsala
University.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:785865/FULLTEXT02>

Reflexão interna marrom na **goethita**. A anisotropia da **covellita** é forte e as cores são diferentes tons de laranja, vermelho e marrom.

**Luz refletida,
polarizadores #**

Anna Hjeltström (2015)
Copper minerals under
the microscope. Uppsala
University.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:785865/FULLTEXT02>



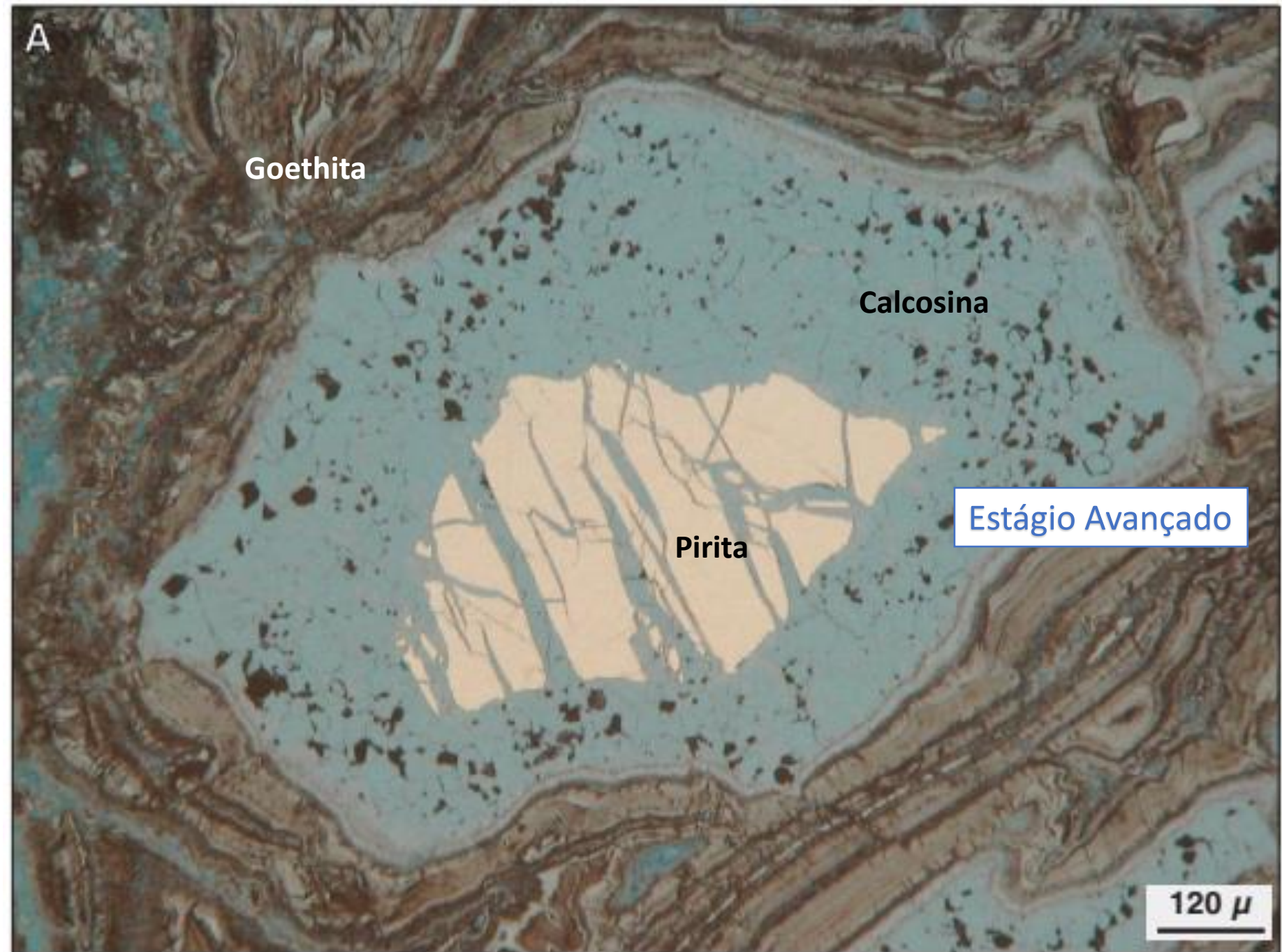
100 μm

Textura de Substituição

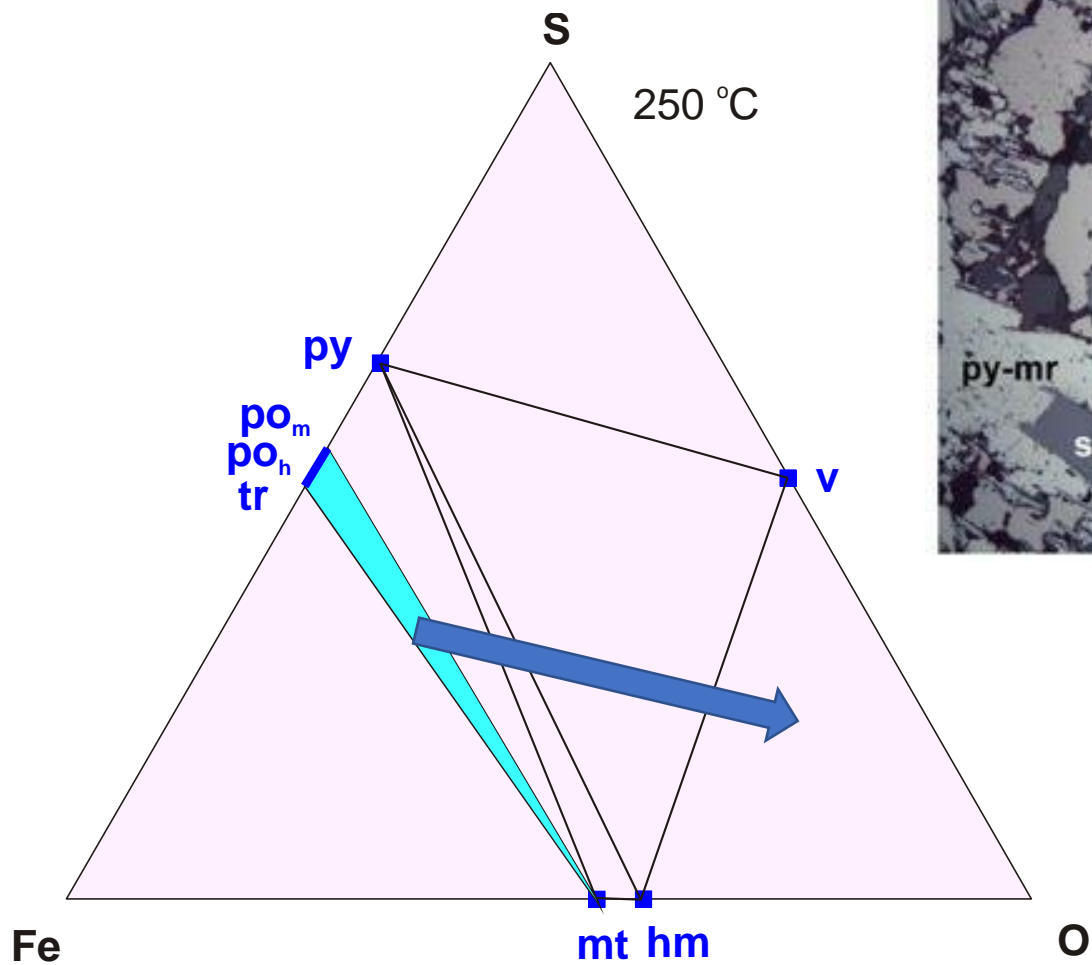
Estágio Avançado

Luz refletida,
polarizadores //

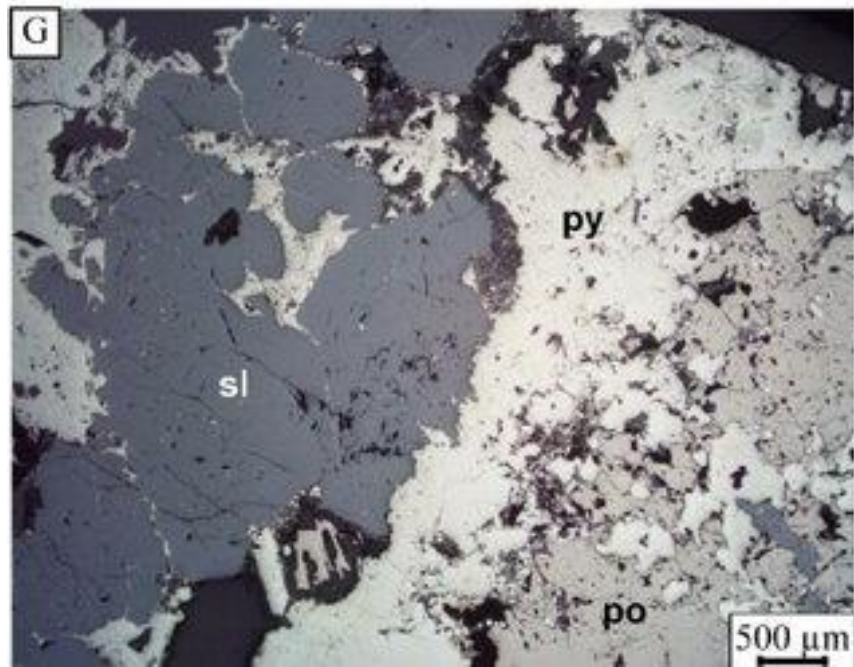
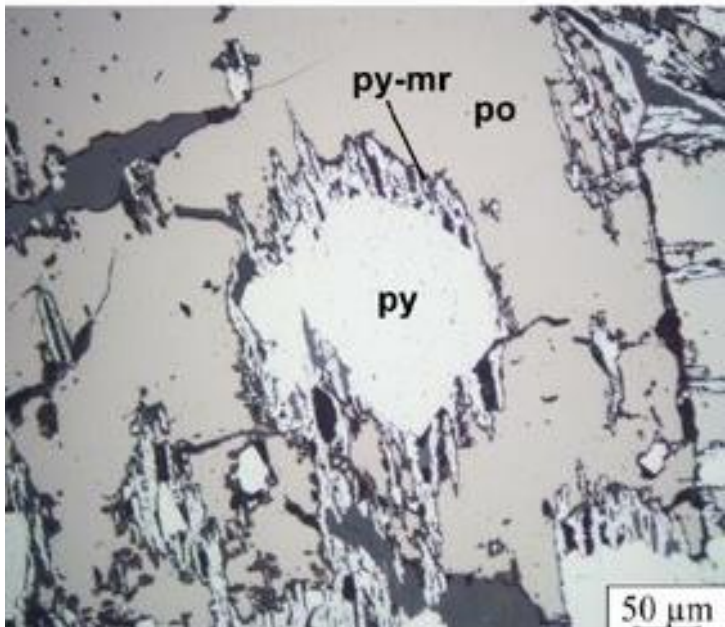
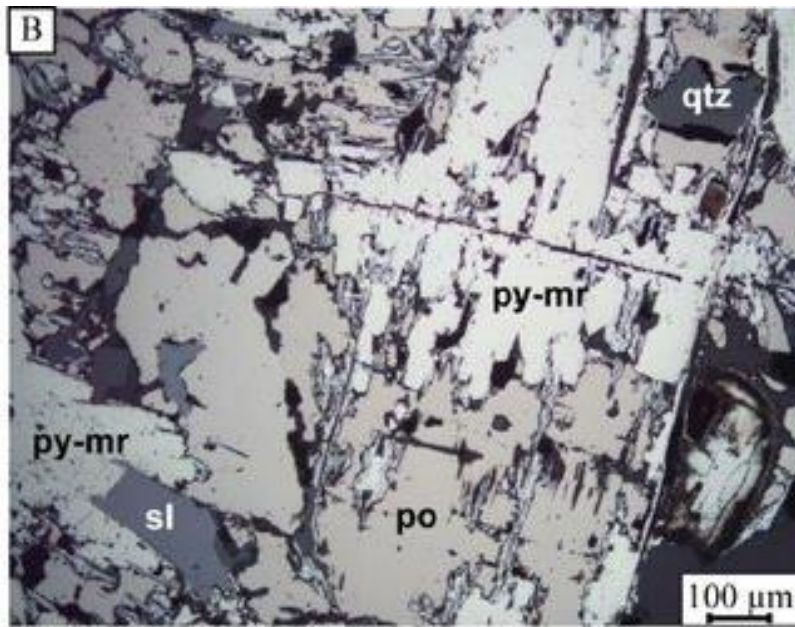
Relíquia de mineral
primário (pirita), substituído
por calcosina e goethita
(Pracejus, 2008)



Texturas de Oxidação



A adição de oxigênio resulta na extração de ferro das fases minerais e a conversão da **pirrotita hexagonal** em **pirrotita monoclinica**, em **pirita** ou **marcassita**. O ferro extraído pode formar um óxido ou hidróxido (goethita, limonita) ou pode ser removido do sistema por fluidos.

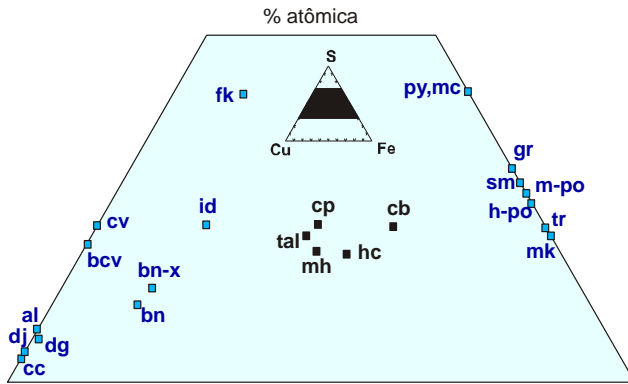


Agregados de pirita e marcassita substituindo pirrotita

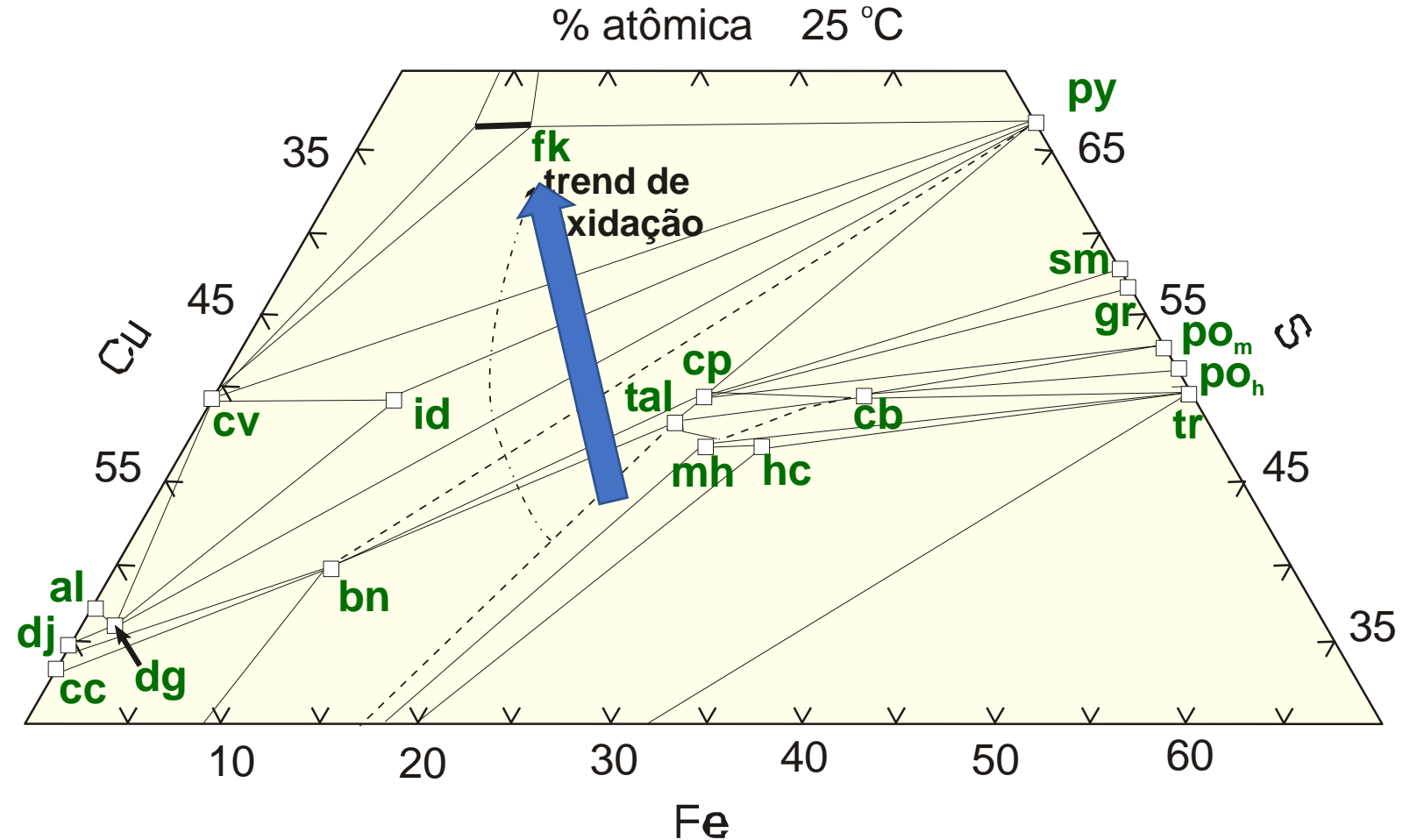
• [Rottier et al. \(2012\)](https://www.researchgate.net/publication/280307478_Early_mineralization_at_Cerro_de_Pasco_central_Peru_revisited)
https://www.researchgate.net/publication/280307478_Early_mineralization_at_Cerro_de_Pasco_central_Peru_revisited

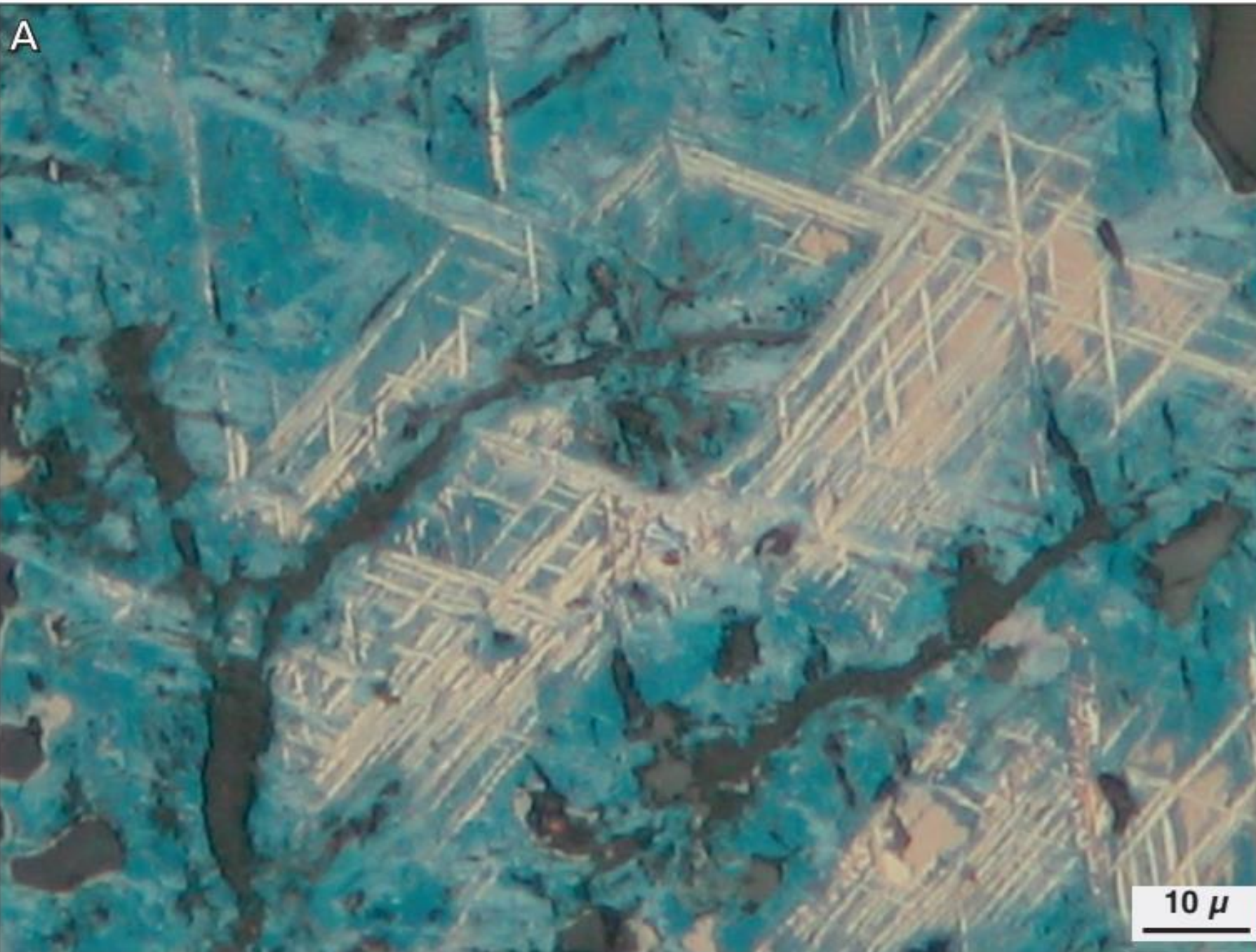
Intemperismo no Sistema Cu-Fe-S

Substituição da calcopirita por bornita, digenita e covellita



O intemperismo dos sulfetos de cobre-ferro é mostrado esquematicamente pelo seta no sistema Cu-Fe-S. O ferro é preferencialmente removido da calcopirita (**cp**), formando **bornita** (**bn**) e, em última instância, **digenita** (**dg**) e/ ou **covellita** (**cv**). A pirita pode se formar, mas geralmente está ausente devido à dificuldade de nucleação pirita em baixas temperaturas





Textura de Substituição

Estágio Avançado

Luz refletida,
polarizadores //

Covellita (azul,
birrefletância forte)
substituindo bornita
(relictos acastanhados) e
calcopirita (lamelas
amarelas); Avila,
Salamanca, Espanha; Nic. //

Pracejus (2008)

Depósitos de Cobre do tipo Pórfiro

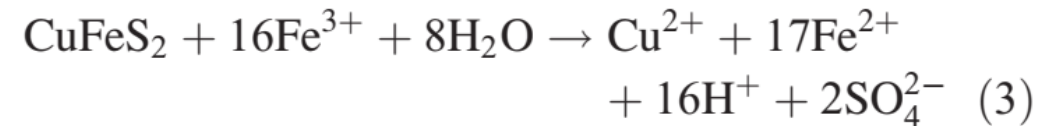
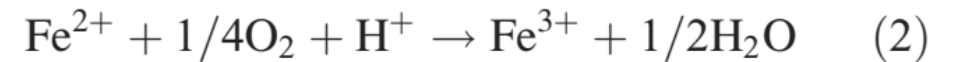
Sulfetos supérgenos em depósitos do tipo pórfiro

TABLE 1. MINERALS IN THE SYSTEM Cu–S

Name	Formula	Cu:S
Chalcocite	Cu₂S	2
Djurleite	Cu₃₁S₁₆	1.9375
Digenite*	Cu₉S₅	1.8
Roxbyite	Cu ₉ S ₅	1.8
Anilite	Cu₇S₄	1.75
Geerite	Cu ₈ S ₅	1.6
Spionkopite	Cu ₃₉ S ₂₈	1.39
Yarrowite	Cu ₉ S ₈	1.125
Covellite	CuS	1
Villamaninite	CuS₂	0.5

Note: * Digenite is stable only in the system Cu–Fe–S.

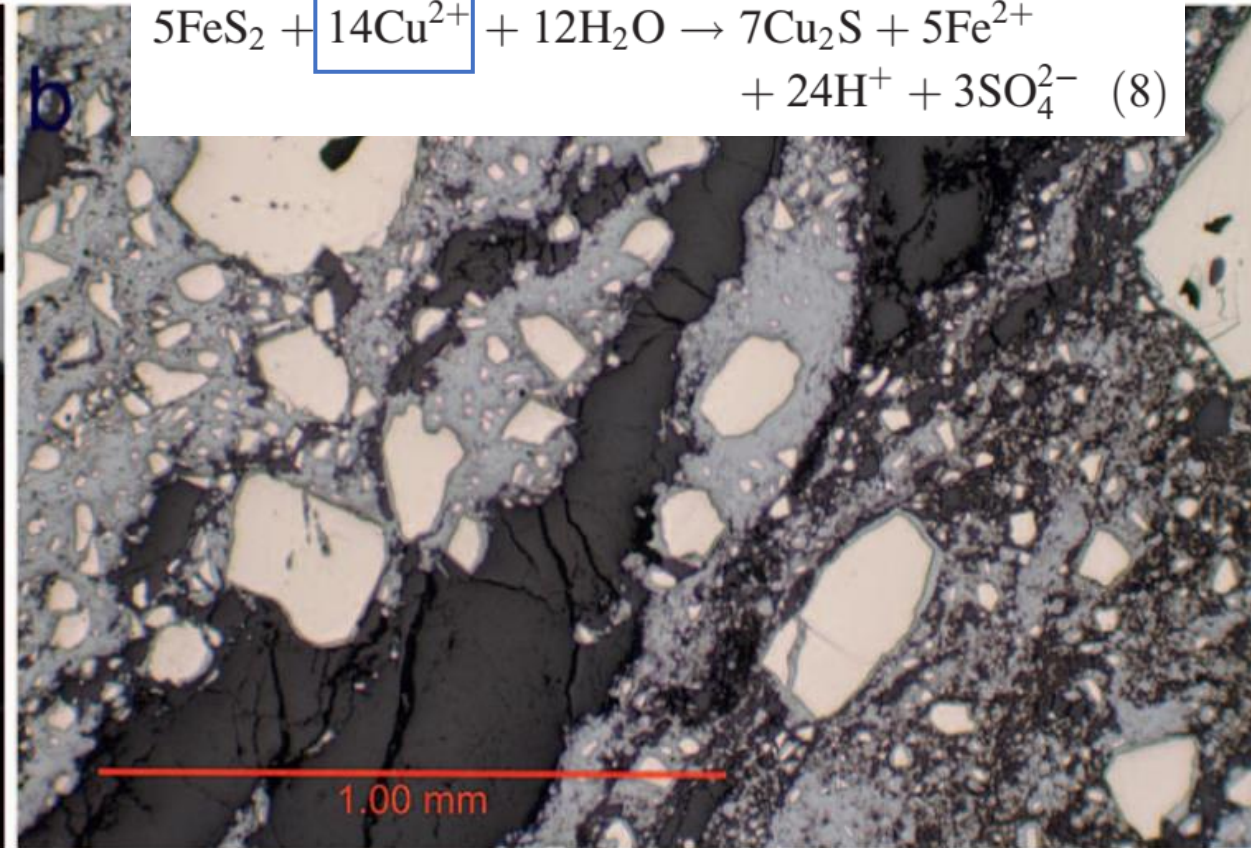
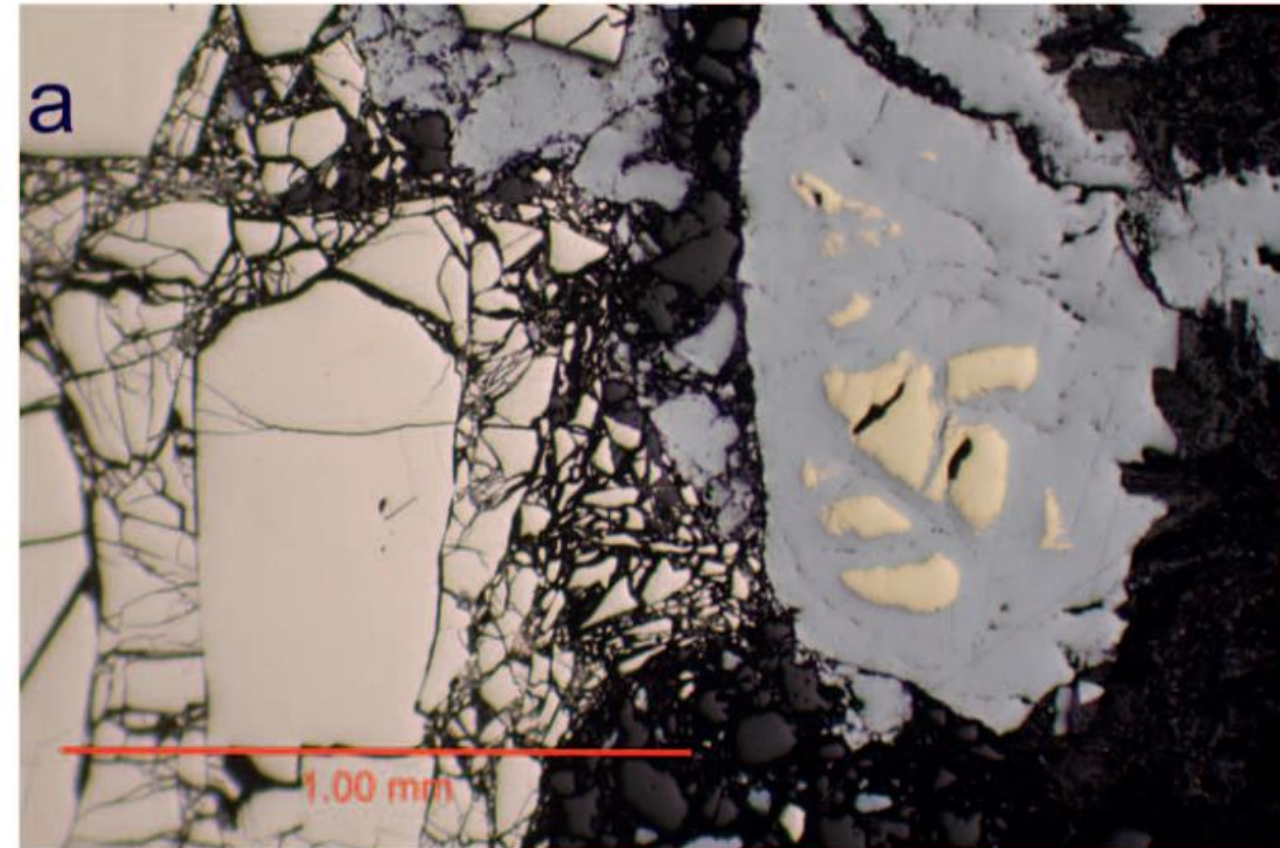
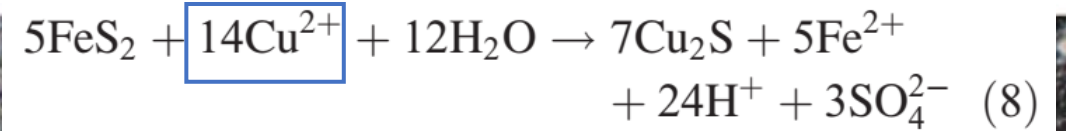
A água reage com a pirita e forma **ácido sulfúrico** e **íon férrico** [reações (1) e (2)] sob condições oxidantes, que então reage com calcopirita para dissolver o cobre pela reação (3):



Soluções ricas em cobre migram para baixo e precipitam sulfeto de cobre por reação com sulfeto hipógenos. O perfil supérgeno consiste em duas zonas: **(1) uma zona estéril e lixiviada** na qual os sulfetos hipógenos foram lixiviados e **(2) uma zona de enriquecimento** na qual sulfetos supérgenos substituem sulfetos hipogênicos.

MINERALOGICAL PROFILE OF SUPERGENE SULFIDE ORE IN THE WESTERN COPPER AREA, MORENCI MINE, ARIZONA

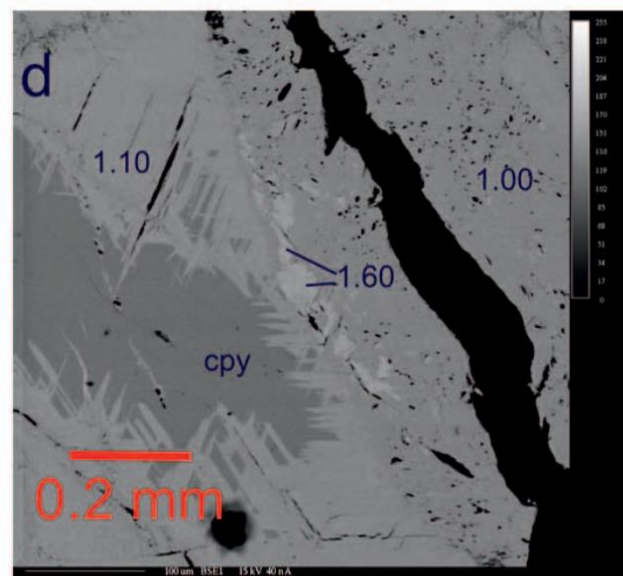
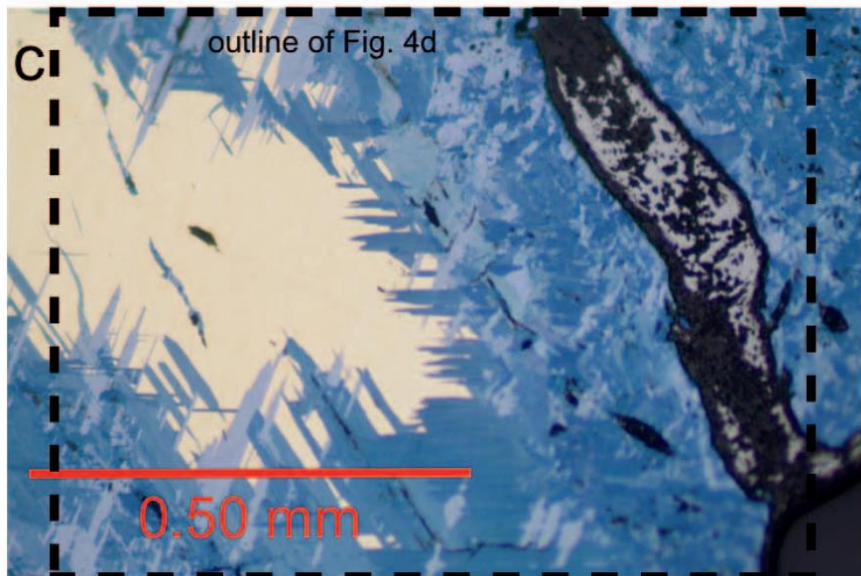
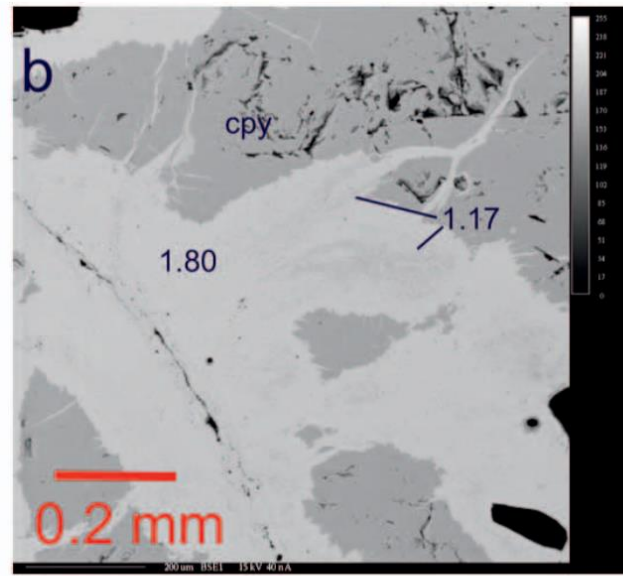
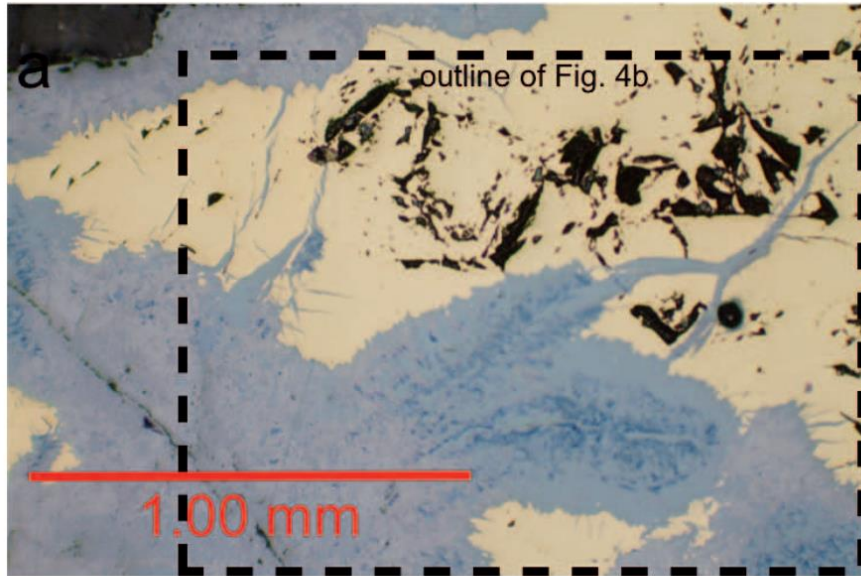
Pirita substituída por calcocita



Fotomicrografias de luz refletida (luz plana polarizada): (a) Calcopirita (amarelo acobreado) é principalmente substituída por calcocita, enquanto a pirita associada (amarelo claro) é relativamente preservada. (b) Nenhuma calcopirita está presente, e a pirita (amarelo claro) é contornada e parcialmente substituída por calcocita.

The Canadian Mineralogist
Vol. 57, pp. 391-401 (2019)
DOI: 10.3749/canmin.1800020

MINERALOGICAL PROFILE OF SUPERGENE SULFIDE ORE IN THE WESTERN COPPER AREA, MORENCI MINE, ARIZONA



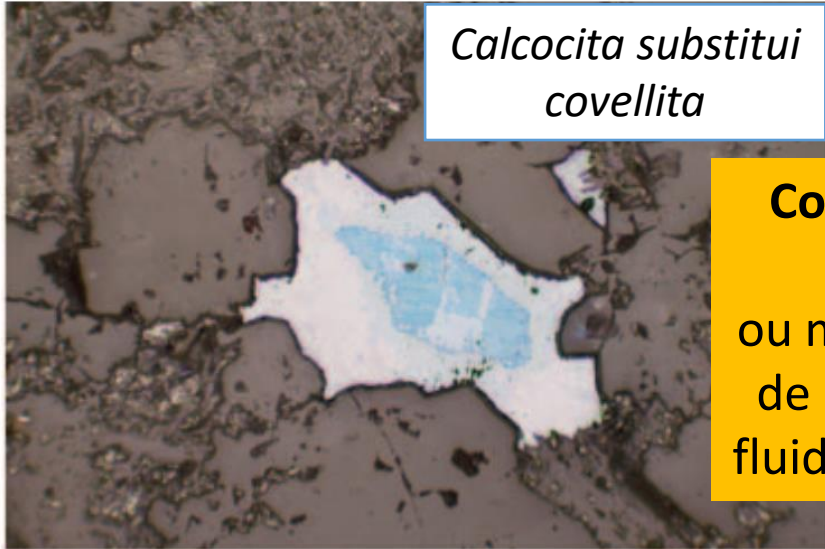
Fotomicrografias de luz refletida (a, c) e imagens BSE (b, d).

(a) Duas gerações de sulfetos de cobre (cinza mosqueado a cinza azulado e azul) com veios e substituições de calcopirita (amarelo acobreado) (c) Calcopirita substituída por sulfetos de cobre semelhantes a covellita. (d) O sulfeto de cobre azul, que parece ser uma fase única sob luz refletida, na imagem BSE (d) corresponde a três fases distintas (com diferente razão Cu+Fe/S)

The Canadian Mineralogist
Vol. 57, pp. 391-401 (2019)
DOI: 10.3749/canmin.1800020

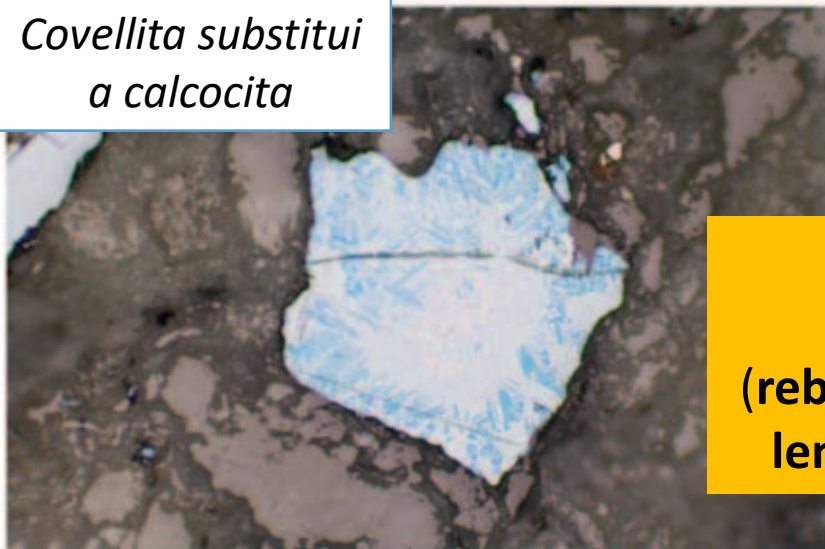
Substituição entre sulfetos supérgenos

MINERALOGICAL PROFILE OF SUPERGENE SULFIDE ORE IN THE WESTERN COPPER AREA, MORENCI MINE, ARIZONA



Calcocita substitui covellita

Condições mais reduzidas ou maior atividade de Cu^{2+} e Fe^{2+} no fluido descendente



Covellita substitui a calcocita

Condições oxidantes (rebaixamento do lençol freático)

Substituição da calcocita por covellita



Calcocita

Covellita

Exemplo de lixiviação progressiva de cobre, sob condições oxidantes, de uma geração de sulfeto supérgeno mais antiga devido ao rebaixamento do lençol freático

Associações minerais supergênicas em depósitos de sulfeto maciço vulcanogênico (VMS) selecionados

New South Wales, Australia ¹	Flambeau VMS deposit, Wisconsin ²	Bathurst deposits, Canada ³	Bisha mine, Eritrea ⁴	TAG site, Mid-Atlantic Ridge ⁵
Gossan: goethite, hematite	Chert gossan: quartz (chert), hematite, goethite, jarosite, native copper, native gold	Massive sulfide gossan: goethite, amorphous silica, jarosite, plumbojarosite, argentojarosite, beudantite, scorodite, bindheimite	Hematite-goethite-quartz oxide zone (gossan): hematite, goethite, quartz, chalcedony, native gold, pyrargyrite	Oxidized sulfides: amorphous Fe oxyhydroxide, goethite, jarosite, amorphous silica, atacamite, native copper
Phosphate zone: pyromorphite	Argillic gossan: quartz, hematite, goethite, chlorite, montmorillonite, alunite-jarosite		Kaolinite-quartz-sulfate zone: kaolinite, illite, gypsum, alunite, quartz, beudantite, anglesite, cerrusite, siderite, chlorargyrite, native gold	
Carbonate zone: cerussite, smithsonite	Ankerite gossan: ankerite, hematite, native gold			
Sulfate zone: anglesite, alunite, plumbojarosite, malachite, azurite, barite, stolzite, scorodite	Oxide zone: cuprite, goethite, malchite, azurite, native silver			
Supergene sulfide zone				
chalcocite, enargite	chalcocite, bornite, chalcopyrite	covellite, chalcocite, digenite, acanthite, anglesite	chalcocite, digenite, covellite, bornite, enargite	digenite, covellite, borite, native gold, native copper
Primary massive sulfide				
pyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite, arsenopyrite, tetrahedrite-tennantite	pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena, pyrrhotite	pyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite, arsenopyrite	pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena, pyrrhotite, arsenopyrite, tetrahedrite, tennantite	marcasite, pyrite, sphalerite, chalcopyrite, bornite



Zona de Oxidação



Zona de Enriquecimento Supérgeno

<https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/c/Chapter12SIR10-5070-C-3.pdf>

Depósitos VMS: Minerais Supérgenos

Mineral	Formula
Supergene	
chalcocite	Cu_2S
bornite	Cu_5FeS_4
digenite	Cu_9S_5
covellite	CuS
enargite	Cu_3AsS_4
chalcopyrite	CuFeS_2
acanthite	Ag_2S
Gossan	
goethite	$\text{FeO}(\text{OH})$
hematite	Fe_2O_3
amorphous Fe oxyhydroxide	
amorphous silica	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
quartz	SiO_2
kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
chlorite	
montmorillonite	
gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
jarosite	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
plumbojarosite	$\text{PbFe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$
argentojarosite	$\text{AgFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
alunite	$\text{KAl}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$

beudantite	$\text{PbFe}_3(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$
corkite	$\text{PbFe}_3(\text{PO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$
hinsdalite	$(\text{Pb},\text{Sr})\text{Al}_3(\text{PO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$
plumbogummite	$\text{PbAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$
anglesite	PbSO_4
barite	BaSO_4
pyromorphite	$\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{PO}_4)$
siderite	FeCO_3
cerussite	PbCO_3
smithsonite	ZnCO_3
ankerite	$\text{CaFeMg}(\text{CO}_3)_2$
malachite	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
azurite	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$
scorodite	$\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
bindheimite	$\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_6(\text{O},\text{OH})$
cinnabar	HgS
cuprite	Cu_2O
stolzite	PbWO_4
native silver	Ag
acanthite/argentite	Ag_2S
chlorargyrite	AgCl
iodargyrite	AgI
native gold	Au
electrum	(Au,Ag)
native copper	Cu
atacamite	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$

<https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/c/Chapter12SIR10-5070-C-3.pdf>