

GEOCIÊNCIAS USP

Depósitos de sulfetos maciços hospedados em rochas vulcânicas (VHMS)



Galena-sphalerite-chalcocopyrite ore at Aijala. Field of view about 10 cm. Photo Jani Vaatainen.

SISTEMAS HIDROTERMAIS SUBMARIOS

↓

DESCARGA DE SOLUÇÕES HIDROTERMAIS NO ASSOALHO OCEÂNICO

• **DEPÓSITOS DE SULFETOS MACIÇOS**

- Depósitos associados ou hospedados em rochas vulcânicas

Volcanogenic massive sulfide ou *volcanic-exhalative massive sulfide deposits* (VMS) ou

Volcanic-associated or volcanic-hosted deposits (VHMS)

Importante fonte de metais base: Cu, Zn, Pb, Ag, Au (Sn, Cd, Sb, Bi)

• **DEPÓSITOS DE SULFETOS MACIÇOS HOSPEDADOS EM VULCÂNICAS**

São depósitos de **sulfetos** maciços e disseminados, intimamente associados a **rochas vulcânicas** diversas e, por vezes, com os sedimentos, em **fundo oceânico**.

Possuem sulfetos variados, principalmente, de **Cu** (calcopirita), **Pb** (galena), **Zn** (esfalerita), e apresentam-se quase **sempre** anômalos em **Au** e **Ag**.

• **DEPÓSITOS DE SULFETOS MACIÇOS HOSPEDADOS EM VULCÂNICAS**

Associados intimamente a **vulcanismo subaquático e fumarolas submarinas (black e white smokers)**;

As rochas vulcânicas são alteradas devido a interações com água do mar, resultando em **espilitização** (máficas) e **keratolização** (ácidas), exalações e precipitados químicos.



Exemplos modernos de descarga de soluções hidrotermais no assoalho oceânico: "black and white smokers"



EXEMPLO: ARCO DE ILHA TONGA-KERMADEC E SISTEMA DE RETRO-ARCO

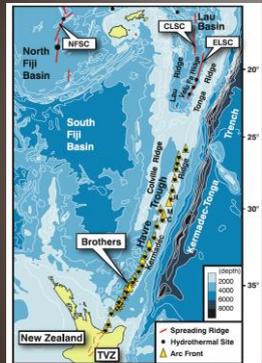


Fig. 1 Tectonic setting of the Tonga-Kermadec arc-back-arc system with the Australian and Pacific plates located west and east of the Tonga-Kermadec Trench, respectively. Flanking the Havre Trough, the remnant ~5 Ma Colville Ridge and Kermadec Ridge (~5 Ma (?) form longitudinally continuous ridges. The Kermadec active arc front (c.1.5 Ma) lies within the Havre Trough NE of New Zealand and merges with the Kermadec Ridge south of the Kermadec islands, Raoul (R), Macauley (M), and Curtis (C). Volcanoes of the Tonga-Kermadec arc front occur within a 40-km-wide zone that extends for ~2,500 km and is populated by ~50 volcanic centers (de Ronde et al., unpublished data). Depth contours are 1,000 m with shading every 2,000 m. AFSC North Fiji Spreading Centre, CLSC Central Lau Spreading Centre, ELSK Eastern Lau Spreading Centre, TVZ Taupo Volcanic Zone

Miner Deposita (2011) 46:541–584

Sistemas hidrotermais submarinos

Ocorrem em diferentes ambientes tectônicos:

- Cadeias meso-oceânicas;
- Riftes;
- Bacias de retro-arco



Os depósitos VMS do Japão, conhecidos como depósitos do tipo **Kuroko**, são os mais similares aos "black smokers" e associam-se principalmente a bacias de retro-arco.

Os sistemas modernos em ambiente de riftes apresentam características intermediárias entre os VMS e os depósitos **sedimentares-exalativos (SEDEX)**, sugerindo uma transição contínua entre os dois tipos.

Os sistemas modernos produzem depósitos muito menores (~ 0,2 Mt) que seus análogos antigos (~ 10Mt). A razão dessa diferença é desconhecida.

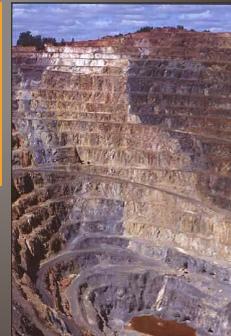
DEPÓSITOS VULCANO-EXALATIVOS DE SULFETOS MAÇICOS (VMS)

Exemplos de depósitos de metais base VMS gigantes (> 50 Mt):
Kidd Creek, Flin Flon, Brunswick (Canadá), Rio Tinto e Neves Corvo (Espanha)

Os depósitos VMS podem ser:
• Depósitos de **Cu-Zn**
• Depósitos de **Cu-Zn-Pb**

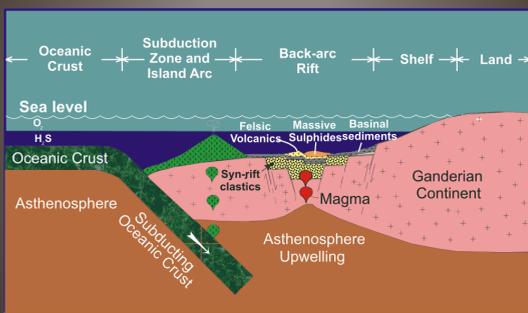
Os depósitos VMS podem ser divididos em:
• Depósitos do tipo **Noranda**
• Depósitos do tipo **Kuroko**
• Depósitos do tipo **Besshi**
• Depósitos do tipo **Chipre**

Os depósitos VMS, em geral, apresentam tamanho médio (8 a 10 Mt) e teores médios de 5 a 8 % de **Cu + Pb + Zn**.

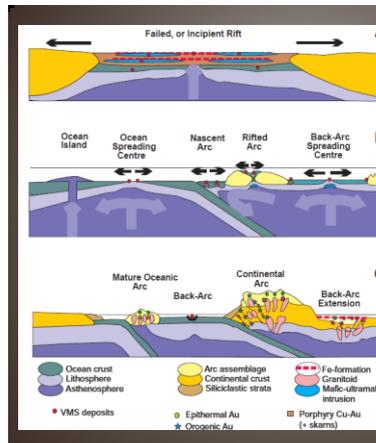


Depósito Rio Tinto, Iberian Pyrite Belt, Espanha

Depósitos VHMS: ambiente tectônico



Formation of the BMC in a back-arc continental rift partly filled with a clastic sedimentary syn-rift sequence overlain by interbedded black shale and felsic volcanic rocks that host massive sulphide deposits (from Goodfellow and McCutcheon, 2003).



(A) Arqueano: atividade de plumas mantélicas, rifteamento e formação de bacias e crosta oceânica inicial com basaltos primitivos e komatiitos, associados a BIFs e sills máfico-ultramáficos; **Fanerozoico**: análogos em bacias de retro-arco (rifteamento)

(B) Formação de bacias oceânicas associadas às dorsais meso-oceânicas com predominância de rochas máficas. Nos **arcos oceânicos** rochas vulcânicas bimodais também podem hospedar VMS.

(C) Arcos maduros e subdução oceano-continente resulta na formação de depósitos hospedados por rochas vulcânicas félsicas e por seqüências bimodais com rochas siliciclásticas.

DEPÓSITOS DE SULFETOS MAÇICOS HOSPEDADOS EM ROCHAS VULCÂNICAS

Tipo Chipre

Cu (Zn)

- Associado com rochas vulcânicas básicas e ofiolitos em centros de expansão do assoalho oceânico (meso-oceânicas) e em bacias de retro-arco.
- Lentas ou montes de pirita maciça, sobrepostos por zonas ricas em cobre composta por veios anastomosados de quartzo e sulfetos em basaltos cloritizados

Pirita, calcopirita

Tipo Besshi

Cu-Zn (Au)

- Ocorrem em ambientes mistos, associado com **sedimentos e vulcanismo** basáltico a dacítico relacionado ao estágio inicial de magmatismo cálcio-alcalino de **arcos de ilha**.
- Ocorrem em ambientes estruturais complexos.
- Zonas mineralizadas são ricas em pirrotita e pirita: pouco espessas e lateralmente extensivas.

Pirita, calcopirita e esfalerita

Tipo Kuroko

Cu-Zn-Pb (Ag - Au)

Associado com **vulcanismo mais félsico** (dacítico a riolítico) relacionados aos estágios finais extensionais de evolução de arcos de ilha (**bacias de retroarco**). Zonas de veios e **stockwork** são sotopostas ao minério que apresenta zoneamento geoquímico bem definido (Zn-Pb-Ag) verticalmente e lateralmente.

Galena, esfalerita, calcopirita (+ pirita, tetradrita)

TABLE 1. Tectonic Environments Hosting Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits

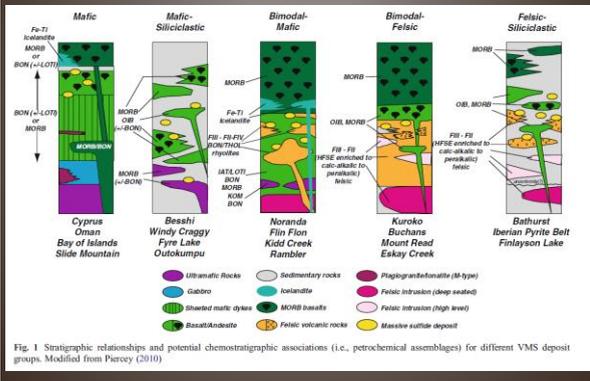
Major tectonic environment hosting volcanic-hosted massive sulfide deposits (after Hamington et al., 2005; Toros et al., 2005; Crawford and Berry, 1992; and Van Kranendonk et al., 2007)	Lithostratigraphic association (Franklin et al., 2005)
Divergent geodynamic settings	
Intracontinental rifts	Clastic-dominated sediment-hosted massive sulfide deposits
Mid-oceanic ridges	Mafic, pelitic-mafic
Intermediate-rate	Mafic
Fast-spreading	Pelitic-mafic
Sedimented ridges	Mafic
Off-axis volcanoes	
Convergent geodynamic settings	
Rifted intraoceanic arc	Bimodal-mafic
Intraoceanic back-arc (Rifted) intraoceanic arc	Mafic, pelitic-mafic
Intraoceanic back-arc	Bimodal-felsic
Other convergent environments	Bimodal-felsic, siliciclastic-felsic
Extension related to oblique collision (Toros et al., 2005)	Siliciclastic-felsic
Postcollisional extension (Crawford and Berry, 1992)	Bimodal-felsic
Intraplate geodynamic settings	
Plume or hot spot	Mafic
Intraplate volcano	
Oceanic plateau	Bimodal-mafic

DEPÓSITOS DE SULFETOS MAÇICOS HOSPEDADOS EM ROCHAS VULCÂNICAS

AMBIENTE TECTÔNICO VS. ASSOCIAÇÃO LITOESTRATIGRÁFICA

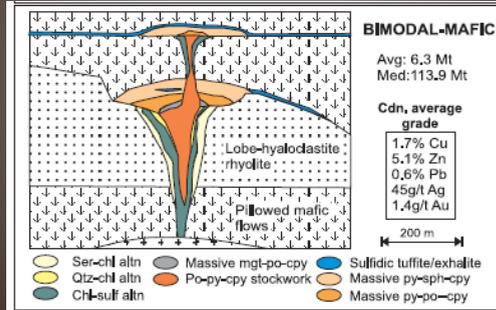
Huston et al. (2010)

AMBIENTE TECTÔNICO VS. ASSOCIAÇÃO LITOESTRATIGRÁFICA

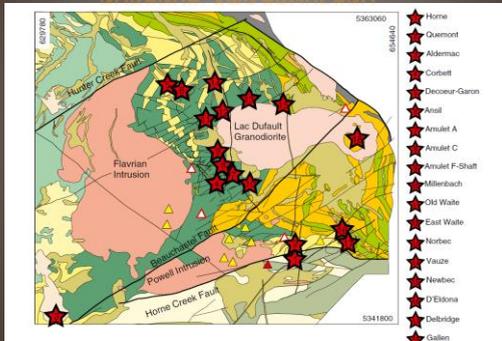


MÁFICO – BIMODAL (ARQUEANOS)

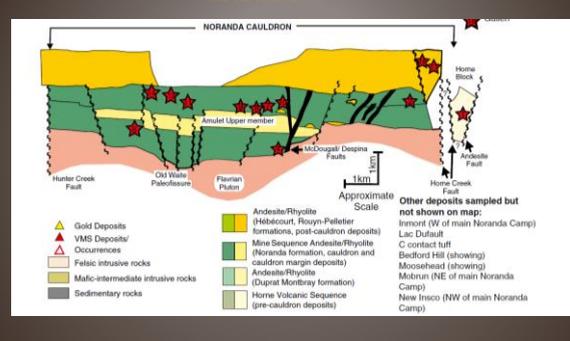
• Depósitos VHMS associados com ambientes dominados por rochas vulcânicas máficas, mas com até 25% rochas vulcânicas félsicas, este último hospedando frequentemente os depósitos. Ex. *Noranda, Flin Flon-Snow Lake e Kidd Creek*.



NORANDA: VMS ARQUEANO

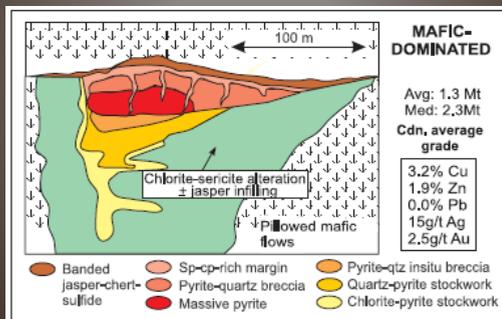


NORANDA



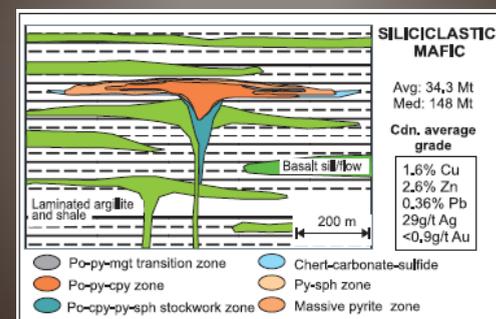
MÁFICO-ASSOCIADO (TIPO CHIPRE)

– Depósitos VHMS associados com ambientes geológicos dominados por rochas máficas, seqüências comumente *afiolíticas*.
– Exemplos: Chipre, Oman e Newfoundland, nas Apalaches.



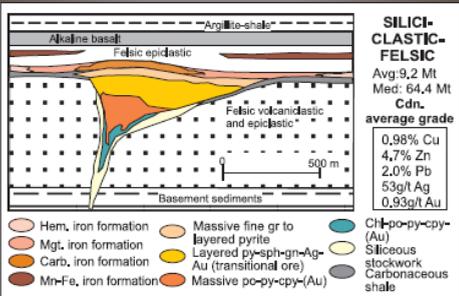
MÁFICO-SILICICLÁSTICO (TIPO BESSHI)

• Depósitos VHMS associados com proporções quase iguais de rochas vulcânicas máficas e siliciclásticas; rochas félsicas podem ser um componente secundário e rochas intrusivas máficas (e ultramáficas) são comuns. Os depósitos Besshi no Japão e Windy Craggy, BC, representam distritos clássicos deste grupo.



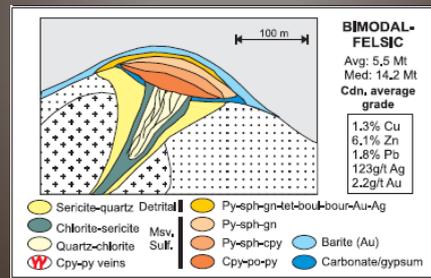
FÉLSICO-SILICICLÁSTICO (CINTURÃO PIRITOSO DA IBÉRIA)

Depósitos VMS associados predominantemente por rochas sedimentares siliciclásticas com abundantes rochas félsicas e menos de 10% de material máfico. São muitas vezes ricos em xistos félsico-siliciclásticos ou siliciclásticos bimodais. Bathurst, New Brunswick, Canadá; Ibérica Pyrite Belt, Espanha e Portugal; e Finlayson Lake, Yukon, Canadá, são os distritos clássicos deste grupo.



BIMODAL-FÉLSICO (TIPO KUROKO)

Depósitos VMS associados com seqüências bimodais, onde rochas félsicas estão em maior abundância que rochas máficas, e tem apenas pequenas porções de rochas sedimentares. Os depósitos de: Kuroko, Japão; Buchans, Canadá; e Skellefte, Suécia são distritos clássicos deste grupo.



ASSOCIAÇÃO DE ROCHAS VULCÂNICAS E DEPÓSITOS DO TIPO KUROKO

Distrito de Hokuroku: caldera submarina formada no estágio tardio de rifte/retro-arco associado ao arco Honshu;

Caldera: vulcânicas bimodais com pillow lavas e hioclastitos basálticos recobertos por lavas riolíticas a dacíticas e brechas vulcânicas;

Domos riolíticos, tufo félsico e brechas piroclásticas cortam e recobrem a seqüência bimodal: pré a sin-mineralização VMS;

Depósitos VMS: recobertos por lamitos e tufo de púmice gerados no início do estágio de vulcanismo do estágio de arco de ilha.

Yamada & Yoshida (2011)

Fig. 5. Geologic map of the Hokuroku district (modified after Yamada and Yoshida 2004)

ASSOCIAÇÃO DE ROCHAS VULCÂNICAS E DEPÓSITOS DO TIPO KUROKO

Yamada & Yoshida (2011)

Depósitos VMS do tipo Kuroko: relacionados à mudanças na atividade vulcânica (composição do magma, estilo da atividade e volume da erupção) e no ambiente tectônico;

- Estágios 1 e 2: vulcanismo de margem continental (0,7 a 1 km);
- Estágio 3: início da bacia de retro-arco (300-500 m) – basaltos com pillow lavas e sedimentos;
- Estágio 4: estágio tardio de rifteamento na bacia de retro-arco (> 5 km de basaltos, rochas vulcanoclasticas, rochas vulcânicas basálticas-andesíticas e seqüências sedimentares);
- Estágios 5 e 6: arco de ilha oceânico (formação da caldeira) – púmice, domos riolíticos, atividade piroclástica, tufo soldados félsicos e brechas;

- Quase todos os depósitos VMS do tipo Kuroko se formaram em um período de 15 a 14 Ma
- Formação dos depósitos coincide com a transição do estágio extensional da bacia de retro-arco ao estágio de arco de ilha;
- Mudança do vulcanismo: de volumosos derrames basálticos e vulcanismo bimodal a púmice félsico em caldeiras em ambiente de águas rasas a terrestre;
- Depósitos associados à colocação de riólitos em 14 Ma;
- Rápida sedimentação clástica foi favorável a preservação dos depósitos VMS;

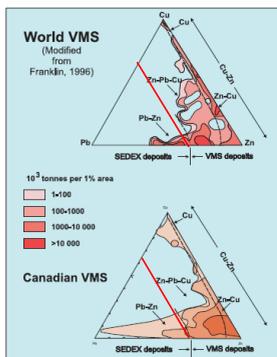


FIG. 2. Base metal classification of worldwide and Canadian VMS deposits as defined first by Franklin et al. (1981) and modified by Large (1992) to include the Zn-Pb-Cu class. The preponderance of Cu-Zn and Zn-Cu VMS deposits in Canada is due to the abundance of Precambrian primitive oceanic arc settings. Worldwide there is a larger proportion of felsic-hosted, more Pb-rich continental and convergent margin arc settings.

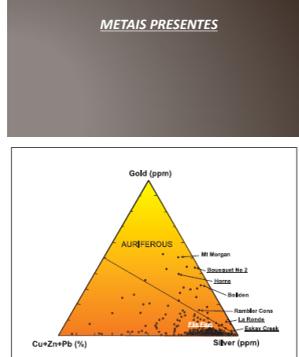
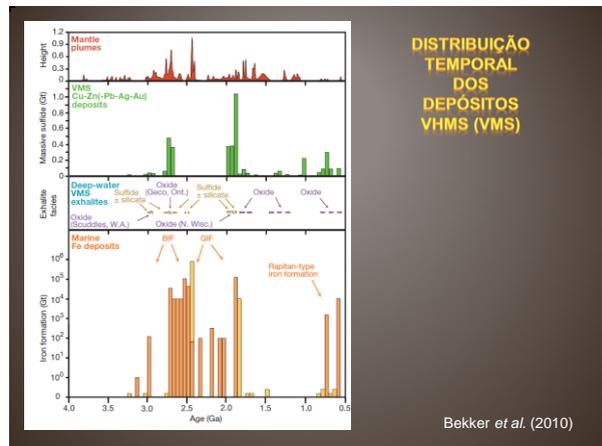


FIG. 3. Classification of VMS deposits based on their relative proportions of Cu+Zn+Pb versus precious metals (Au, Ag, Pt). Some of Canada's better known auriferous deposits (underlined) are compared to international examples. Despite having produced 170 t of Au, the Flin Flon deposit is not considered an auriferous VMS deposit under this classification. Modified from Hannington et al. (1996c).



Bekker et al. (2010)

VHMS: VARIÇÕES SECULARES

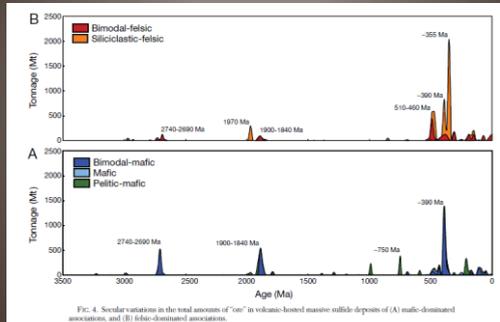
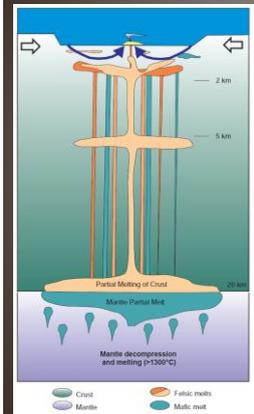


FIG. 4. Secular variations in the total amount of "ore" in volcano-hosted massive sulfide deposits of (A) mafic-dominated associations, and (B) felsic-dominated associations.

Huston et al. (2010)

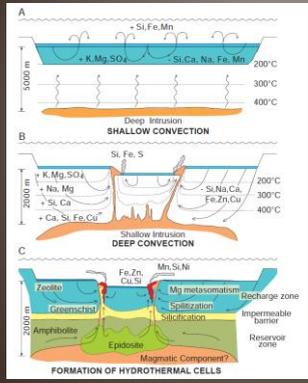


PROCESSOS GENÉTICOS ASSOCIADOS AOS DEPOSITOS VMS

- Tectônica Extensional;
- Afinação cristal
- Despressurização mantélica
- Fusão do manto: magma basáltico
- Acúmulo de magma basáltico na base da crosta: fusão crustal
- Magmas graníticos
- Ascensão do magma
- Calor para sistemas hidrotermais convectivos;

Galey et al. (2007)

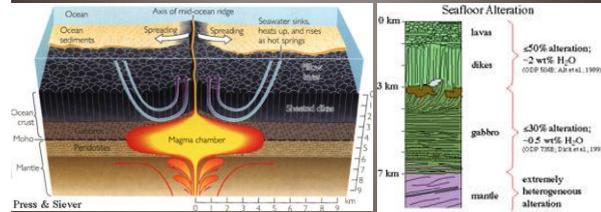
PROCESSOS GENÉTICOS ASSOCIADOS AOS DEPOSITOS VMS



- (A) Intrusões subvulcânicas abaixo de uma caldeira estabelecem um sistema convectivo de baixa temperatura envolvendo a água do mar, resultando em alteração de fundo oceânico e exalitos;
- (B) Intrusão em níveis crustais rasos gera sistemas hidrotermais convectivos;
- (C) Sistema hidrotermal maduro com zonas de alteração hidrotermal bem desenvolvidas. A zona de reação de alta temperatura mais próxima da intrusão permite influxo episódico de fluidos metalíferos para o assoalho oceânico e precipitação de metais, formando os depósitos VMS.

Galey et al. (2007)

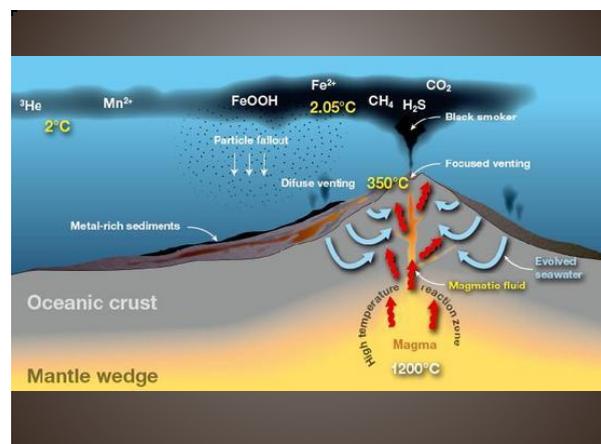
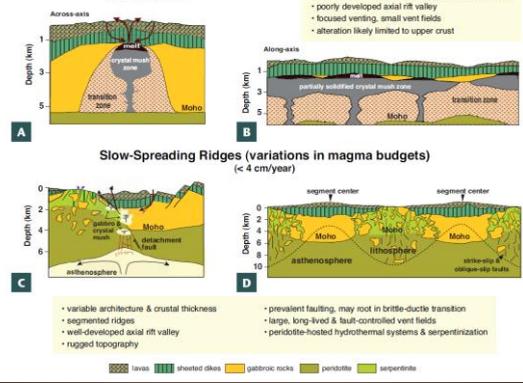
Cadeia meso-oceânica

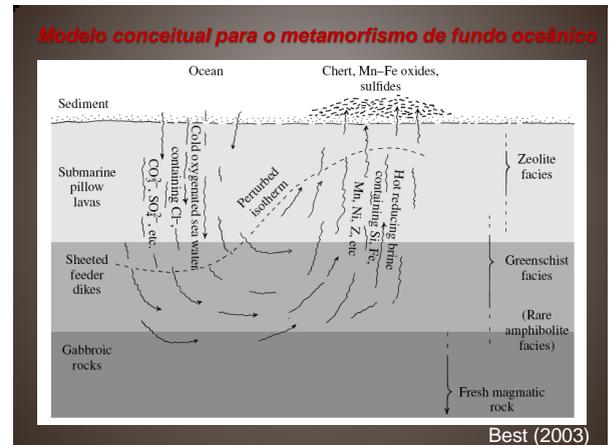
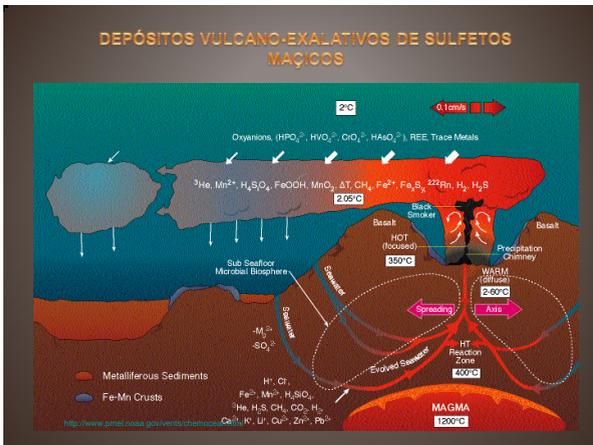
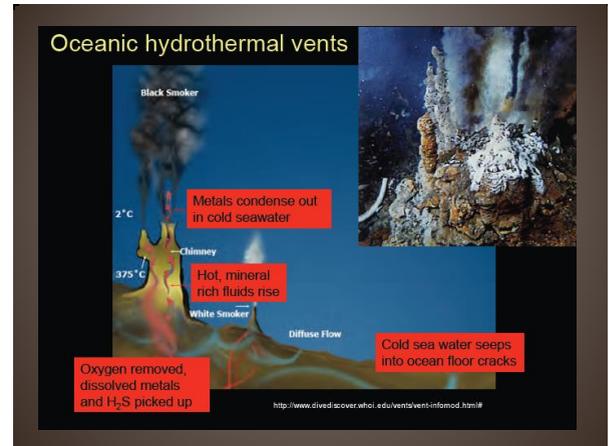


Associado à evolução das dorsais meso-oceânicas, é gerado pelo aquecimento da crosta oceânica em margens divergentes. Forte hidratação de rochas básicas em profundidades superiores a 3 km e temperaturas de 350 a 400 °C.

(Press & Siever, 2002)

Fast-Spreading Ridges (robust magma supply)





SISTEMAS HIDROTERMAIS SUBMARINOS
CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS

- ▶ Soluções aquosas de salinidade 2 a 7 vezes a da H₂O do mar (3,2 % em peso de NaCl)
- ▶ Soluções ácidas, com pH em torno de 3,5
- ▶ Soluções redutoras → H₂S >> SO₄²⁻
- ▶ T = 200 - 400° C
- ▶ Soluções empobrecidas em Mg²⁺
- ▶ Soluções enriquecidas em SiO₂, Ca²⁺, Na⁺, metais base, Cl⁻

DEPÓSITOS VULCANO-EXALATIVOS DE SULFETOS MAÇIÇOS
INTERAÇÃO ÁGUA DO MAR - CRUSTA OCEÂNICA
 Zona de Recarga

Consumo de Mg²⁺ do fluido
 $2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 5\text{Mg}^{2+} + 8\text{H}_2\text{O} = \text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2 + 2\text{Na}^+ + \text{H}^+ + 3\text{SiO}_2(\text{aq})$
 albita clorita

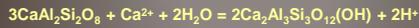
Consumo de Ca²⁺ e SO₄²⁻ do fluido
 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 5\text{Mg}^{2+} + \text{SiO}_2(\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}_2\text{O} = \text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 + 8\text{H}^+$
 anortita clorita anidrita

Redução de SO₄²⁻ do fluido
 $11\text{FeSi}_2\text{O}_4 + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ = \text{FeS}_2 + 7\text{Fe}_3\text{O}_4 + 11\text{SiO}_2(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}$
 olvina pirita magnetita

$28\text{FeS} + 5\text{SO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ = 16\text{FeS}_2 + 4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$

INTERAÇÃO ÁGUA DO MAR - CROSTA OCEÂNICA

Zona de Reação



anortita

epidoto

T > 375° C - 400° C; P = 0,35 kb - 0,5 kb (2,5 km)

baixa razão fluido/rocha e alta concentração de metais

DEPÓSITOS VULCANO-EXALATIVOS DE SULFETOS MAÇICOS

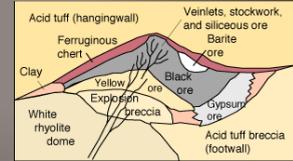
Tipo Kuroko

Rochas vulcânicas formadas em ambiente de arco de ilha: riolito, dacito associados a andesitos ou basaltos

Proximidade de centros de vulcanismo félsico: domos félsicos (riolito ou dacito) com rochas piroclásticas e vulcanoclasticas associadas.

Presença de horizontes de chert com pirita

Presença de falhas extensionais



-Yellow ore (> T):

Da base para o topo: pirita; calcopirita, pirita; calcopirita, pirita, quartzo.

-Black ore: (< T)

Da base para o topo: esfalerita, barita, pirita, galena e tetraédrita; esfalerita, barita, pirita, calcopirita, quartzo

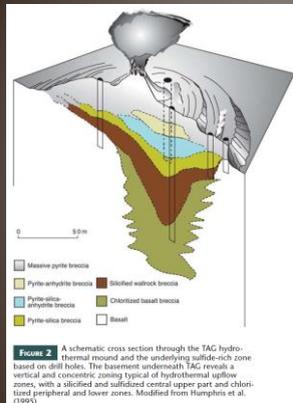
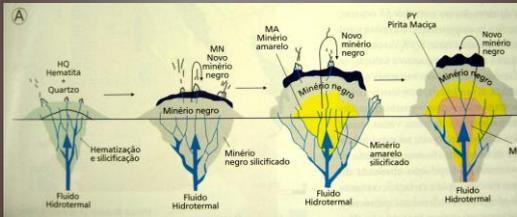


FIGURE 2 A schematic cross section through the TAG hydrothermal mound and the underlying sulfide-rich zone based on drill holes. The basement underneath TAG reveals a vertical and concentric zoning typical of hydrothermal upflow zones, with a silicified and sulfidated central upper part and chloritized peripheral and lower zones. Modified from Humphris et al. (1995).

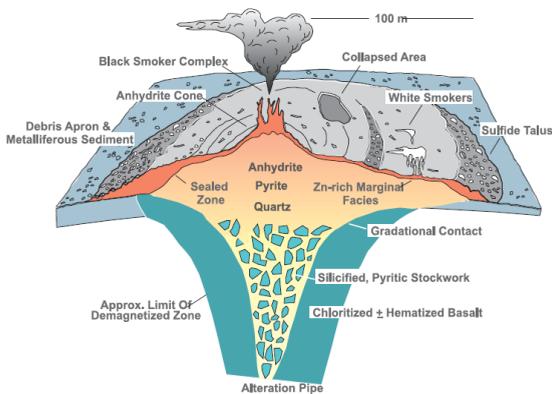


FIG. 1. Schematic of the modern TAG sulfidate deposit on the Mid-Atlantic Ridge represents a classic cross-section of a VMS deposit, with a concordant semi-massive to massive sulfidate lens underlain by a discordant stockwork vein system and associated alteration halo, or "pipe". From Hammon et al. (1996).

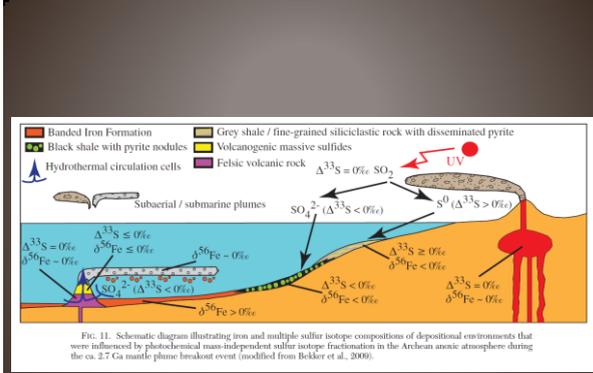
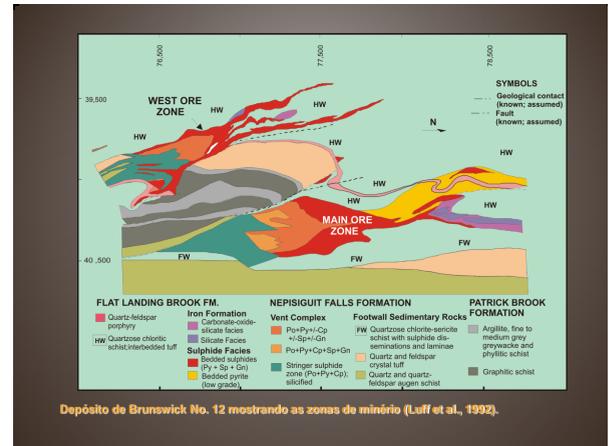
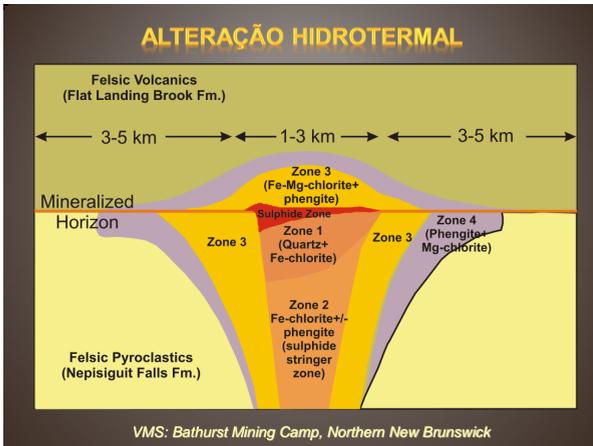
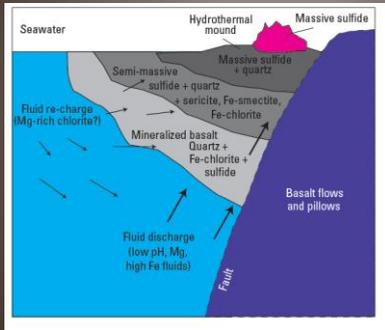


FIG. 11. Schematic diagram illustrating iron and multiple sulfur isotope compositions of depositional environments that were influenced by photochemical mass-independent sulfur isotope fractionation in the Archean anoxic atmosphere during the ca. 2.7 Ga mantle plume breakout event. (modified from Bekker et al., 2006)

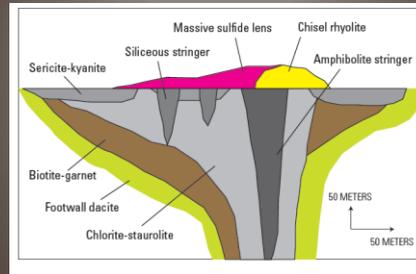


ALTERAÇÃO HIDROTERMAL



Alteração hidrotermal em rochas máficas em seqüência ofiolítica com pilha de hialoclastos

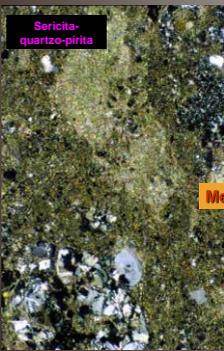
ALTERAÇÃO HIDROTERMAL



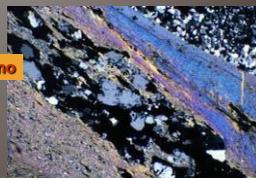
Depósito Chisel Lake, distrito de Snow Lake, Manitoba: zonas de alteração hidrotermal foram metamorfisadas em fácies anfibolito

Alteração hidrotermal

Sericitização



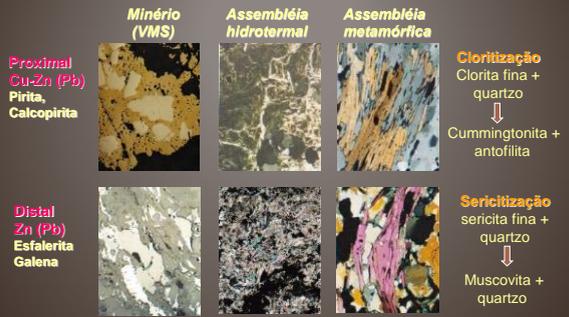
Metamorfismo



Muscovita-quartzo xisto

SULFETOS MAÇIÇOS VULCANO-EXALATIVOS

Halos de Alteração Hidrotermal



Outros tipos de alterações comuns: silicificação, carbonatização, epidotização

SULFETOS MAÇIÇOS VULCANO-EXALATIVOS

Halos de Alteração Hidrotermal na Zona de Stockwork



Pipe de alteração no footwall - centenas de mts abaixo do depósito

Alteração regional propilitica= epidoto-qtz-actinolita alta T (400°C)

Outros tipos de alterações comuns: Mg smectita → zeolita → carbonato → silicificação espilitização - propilitização com o aumento de T (profundidade) e alumino-silicatos (andaluzita).

SULFETOS MAÇIÇOS VULCANO-EXALATIVOS

Zoneamento Metálico

Maior concentração de Cu ou de Pb-Zn

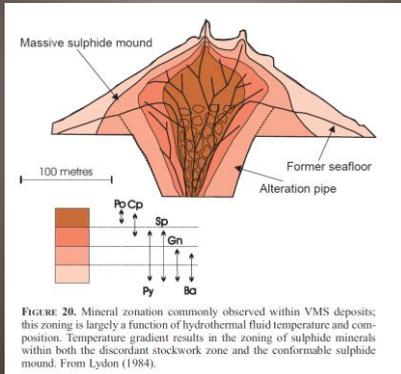
pH baixo e altas T

Zoneamento relacionado à solubilidade da cpy e esfalerita com a T

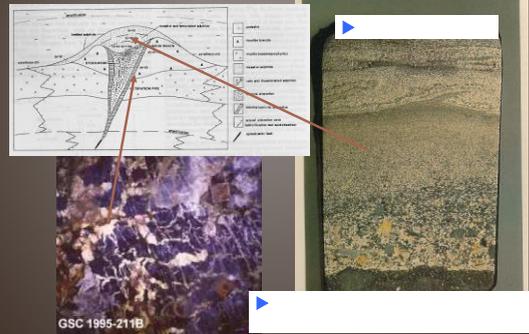
Cpy deposita-se a T mais altas que a esfalerita durante o resfriamento do fluido que tende a ser rápido.



Zonamento Metálico



DEPÓSITOS VULCANO-EXALATIVOS DE SULFETOS MACIÇOS



SULFETOS MACIÇOS EM CHAMINÉS

Galley *et al.* (2007)

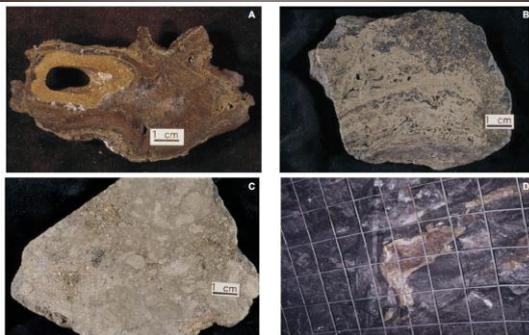
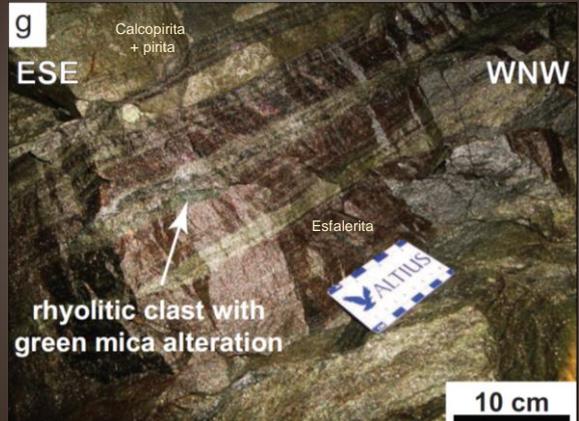
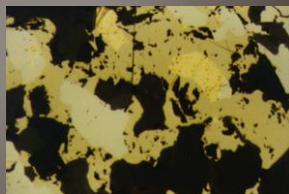


FIGURE 19. (A) Example of a zoned sulphide chimney from the Endeavour Ridge vent field (I.R. Jonasson). (B) Typical textures from a massive sulphide mound, Main vent field, Juan de Fuca Ridge. Mineralogical banding is due to incremental chimney growth, with ovoids representing worm casts. Fragment cemented by later sulphide growth during mound collapse and subsequent invasion by hydrothermal fluid. (C) Classic sandy sulphide ore from Cretaceous Azija deposit, Semail ophiolite, Oman. This common texture is created by repeated mound collapse resulting from anhydrite dissolution and reprecipitating with later sulphide (photo by I.R. Jonasson). (D) Pyrite-sphalerite clast as part of a proximal debris flow, Lovcovout, Val d'Or. 15 cm metal grid for scale.



Minério de Cu-Zn



Calcopirita, pirrota, pirita e ouro nativo



Texturas dos sulfetos

Finamente laminados, maciço

Agnew et al. 2005. Lewis Ponds, a hybrid carbonate and volcanic-hosted polymetallic massive sulphide deposit, New South Wales, Australia. *Mineralium Deposita* 39:822 - 844

a Pirita coloriforme;
b Sobrecrecimento de pirita coloriforme sobre pirita euhedral;
c Calcopirita substituindo pirita;
d Sulfetos preenchendo fraturas;
e Pirita disseminada;
f Detalhe de e

Scomey et al. (2005)

py pyrite, cpy chalcopyrite, sp sphalerite, ba barite, ten tennantite, cov covellite, silica

Pirita framboidal

Outras texturas comuns nos sulfetos dos depósitos vulcanogênicos

Pirita dendrítica

Agnew et al. 2005. Lewis Ponds, a hybrid carbonate and volcanic-hosted polymetallic massive sulphide deposit, New South Wales, Australia. *Mineralium Deposita* 39:822 - 844

SISTEMAS HIDROTERMAIS SUBMARINOS

CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS MINERALIZANTES

Água do mar

"stockwork" Cyprus

Rochas encaixantes Maciço de Troodos

Fluidos magmáticos primários

Composição isotópica de oxigênio do fluido similar à da água do mar.

SISTEMAS HIDROTERMAIS SUBMARINOS

CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS MINERALIZANTES

Temperatura dos fluidos mineralizantes nos depósitos VMS mais alta que nos SEDEX.

Salinidades menores (2 a 7 vezes a salinidade da água do mar)

A

Sulfide Particles Hydrothermal Plume Oxygenated Anoxic

Seafloor Iron Formation

Vents Blebbed Sulfide

Alteration Zone

Local Seawater Recharge

Felsic volcanics

Black shale Impervious Cap

Hydrothermal Fluids (Sn, Pb, Cu, Ag, Cl)

Seawater Recharge

Sulfide Stringer Zone

Hydrothermal Reservoir (Permeable Classic Sediments)

Magmatic Volatiles (S, H, As, Sb)

Sub-volcanic Intrusive

Hydrothermal Reservoir

B

Hydrothermal plume

Felsic Volcanism

Impermeable sediment cap

Seawater Recharge

Synrift Classics

Hydrothermal Reservoir

Magmatic Volatiles

Continental Crust

GUIAS DE EXPLORAÇÃO

1. Identificação de rochas **vulcânicas submarinas**. Importante: presença de "pillow lavas" e sedimentos químicos (chert, formações ferríferas, carbonatos)
2. Evidências de **falhas sin-sedimentares** que possam ter atuado como zonas de alimentação ("debris flow", mudança de fácies abrupta, variações na espessura).
3. Zonas de reação de alta temperatura (quartzo-epidoto-albita). Podem estar associadas à lixiviação de metais das rochas vulcânicas.



Depósito de Cu-Zn Ártico, Alasca (Metabasitos e metaróditos)

4. **Atividade exalativa** (chert com concentrações anômalas de Mn, Fe, Na, Ba, Zn, Pb). Em terrenos metamórficos, granada rica em Mn e estaurolita rica em Zn.

5. Variações regionais nos valores de $\delta^{34}\text{S}$ e assinaturas de isótopos de Pb.

VHMS

Huston et al (2010) Econ. Geol.

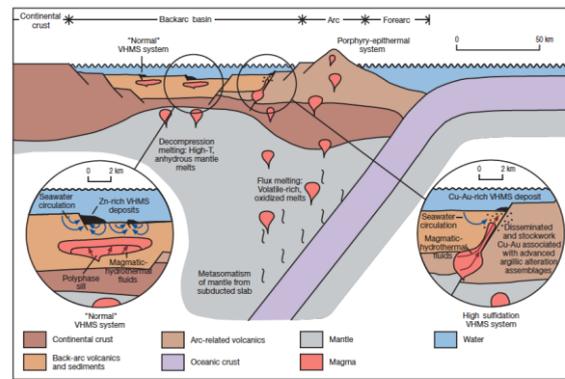


FIG. 1. Diagrams showing possible settings of volcanic-hosted massive sulfide deposits in convergent margins.