Tortona 2026 -2027

Piane abissali: croste e noduli polimetallici

Piero Rossanigo

Piane abissali degli oceani

Buio: la luce del Sole non riesce a raggiungere le grandi profondità, quindi non è possibile la fotosintesi.

Freddo: la temperatura è generalmente compresa tra 0 e 4 °C, anche se vicino alle sorgenti idrotermali può essere molto più alta.

Pressione elevata: aumenta con la profondità e può raggiungere valori enormi nelle fosse oceaniche.

Scarsità di cibo: molti organismi si nutrono dei resti di animali e piante che scendono dagli strati superficiali.

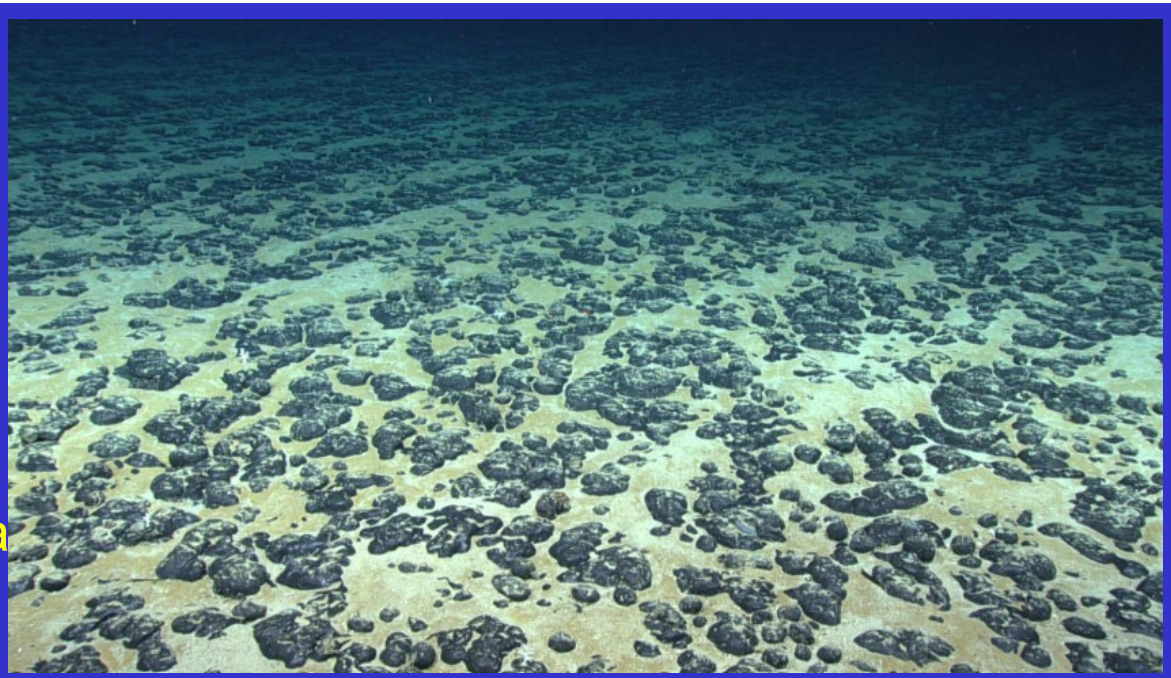
Ambiente particolare: in alcune zone sono presenti sorgenti idrotermali che liberano acqua calda e sostanze minerali.

Piero Rossanigo

NODULI di Mn o POLIMETALLICI

Concrezioni tondeggianti di minerali (5 – 10 cm)

Disseminati su piane sottomarine a 4000 – 6000 m







NODULI POLIMETALLICI – Noduli di Mn

Contengono soprattutto **manganese** ferro nichel rame cobalto molibdeno Vanadio anche Terre Rare o altri minerali strategici

	Noduli	Minerali terrestri
Mn	25 – 35 %	30 – 50 %
Fe	5 – 15 %	20 – 65 %
Ni	1 – 1,5 %	0,5 – 2 %
Cu	0,5 – 1,5 %	0,3 – 1 %
Co	0.1 – 0.3 %	0.01 – 0.2 %

Un nodulo nasce quasi sempre attorno a un piccolo "nucleo"

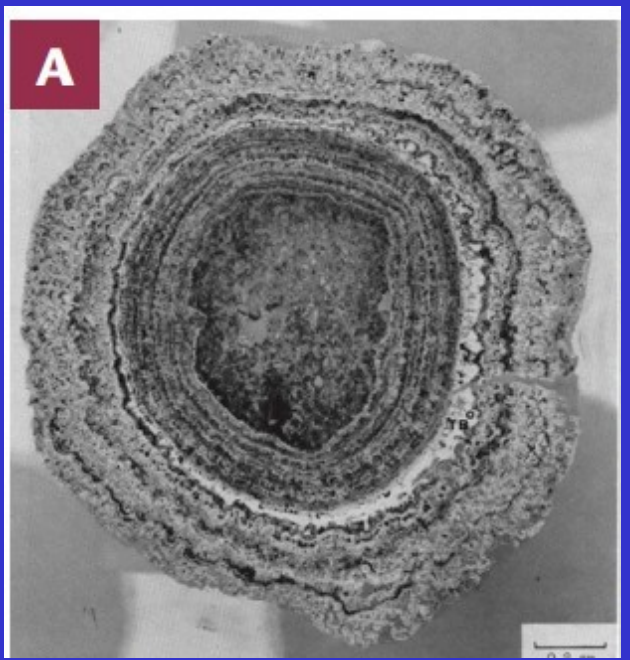
Genesi idrogenetica → precipitazione dall'acqua di mare

Crescita circa 1 – 5 mm ogni milione di anni

Genesi diagenetica → I sedimenti del fondale liberano ioni metallici che poi si accumulano sul nodulo

Crescita circa 5 mm - alcuni cm ogni milione di anni





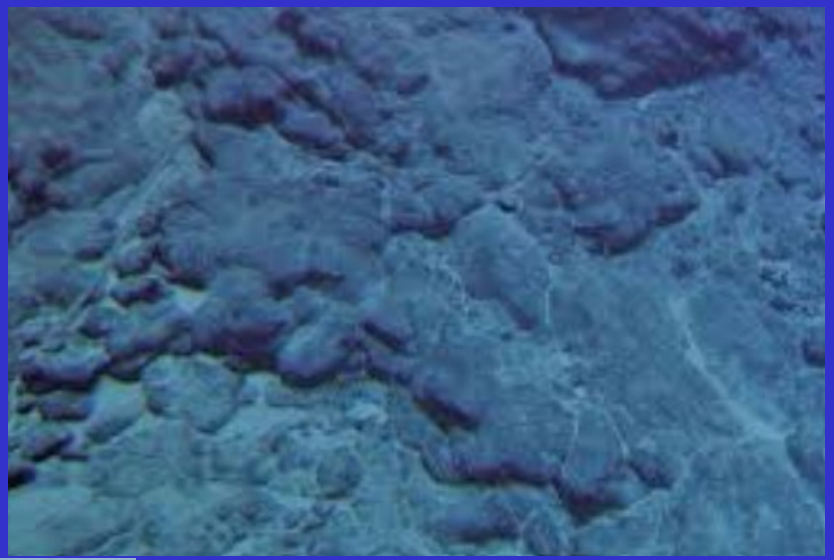
Dove si formano i noduli tassi di sedimentazione molto bassi

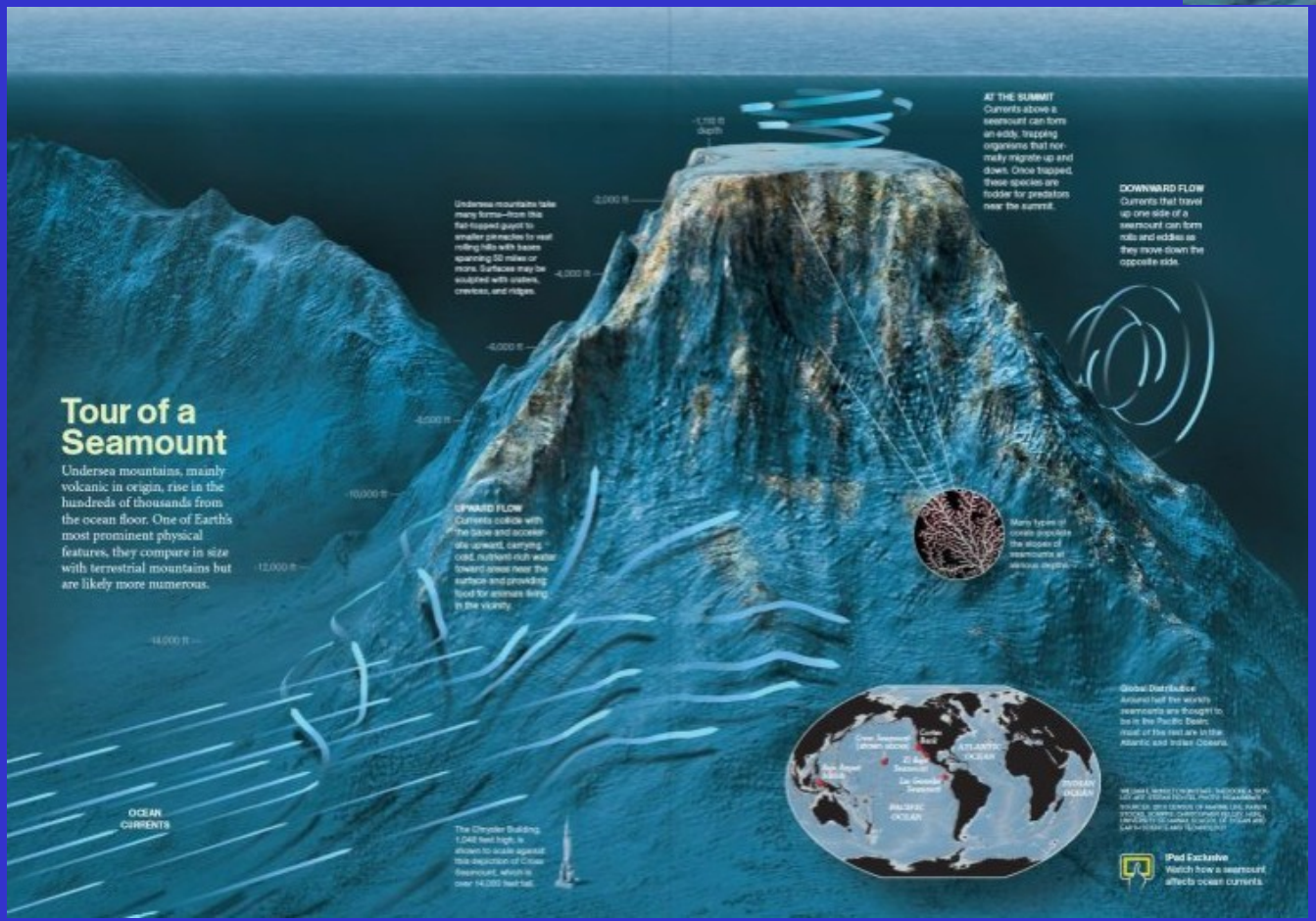





Top view
2 cm
Bottom view
Side view
Cross-section
Surface
Core
Bottom

Croste polimetalliche
Ferro e Cobalto



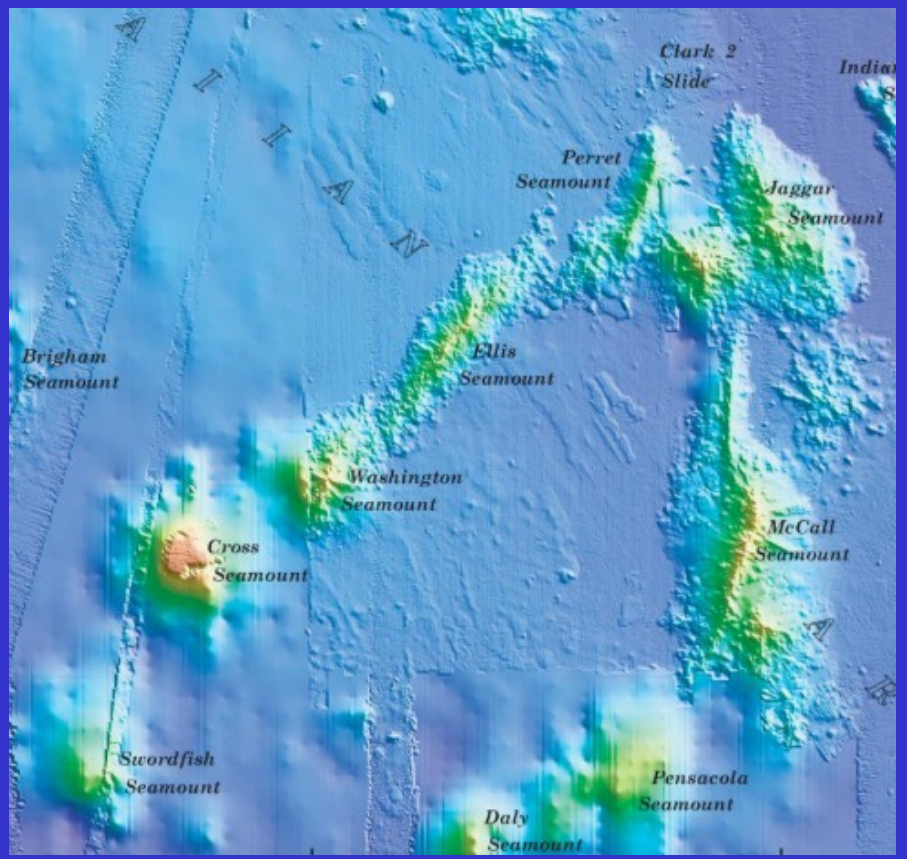


Croste di Cobalto

Nelle piane abissali si innalzano vere e proprie montagne (spesso vulcani) sottomarine, alte da 1000 a 4000 m, seamounts. Negli oceani ci siano 33.000 seamounts.

Molti sono ricoperti da “tappeti” di **croste di Fe** e **Co** contengono **ossidi di manganese** e **ossidi di ferro**

Non contengono solo Fe e Co ma anche nichel, manganese e terre rare (oltre a tracce di molibdeno, tellurio, zirconio e platino)





Si depositano fra i 400 e i 4000 m e anche più

Metalli disciolti nell'acqua marina Precipitazione chimica Accrescimento strato dopo strato
Crescita lentissima circa 1–10 mm per milione di anni
Condizioni ideali per la crescita sono:
correnti marine costanti che trasportano minerali disciolti e tengono le superfici rocciose (vulcaniti) pulite, con poca sedimentazione per milioni di anni: non si deposita sedimento soffice come sulle piane abissali

Potenziale redox (Eh): ossidazione dei metalli le correnti portano ossigeno

Lievi cambiamenti di pH (solitamente sui fondi oceanici 7,5 – 8) lieve aumento

Co Ni e altri elementi vengono adsorbiti

Studi recenti indicano la possibilità di un **contributo biogenico**; alcune specie di batteri e funghi accelerano la velocità di ossidazione del Mn^2

Batteri vivono all'interno e sulla superficie dei noduli e delle croste di Fe–Mn, compresi gli ossidanti e i riduttori del manganese



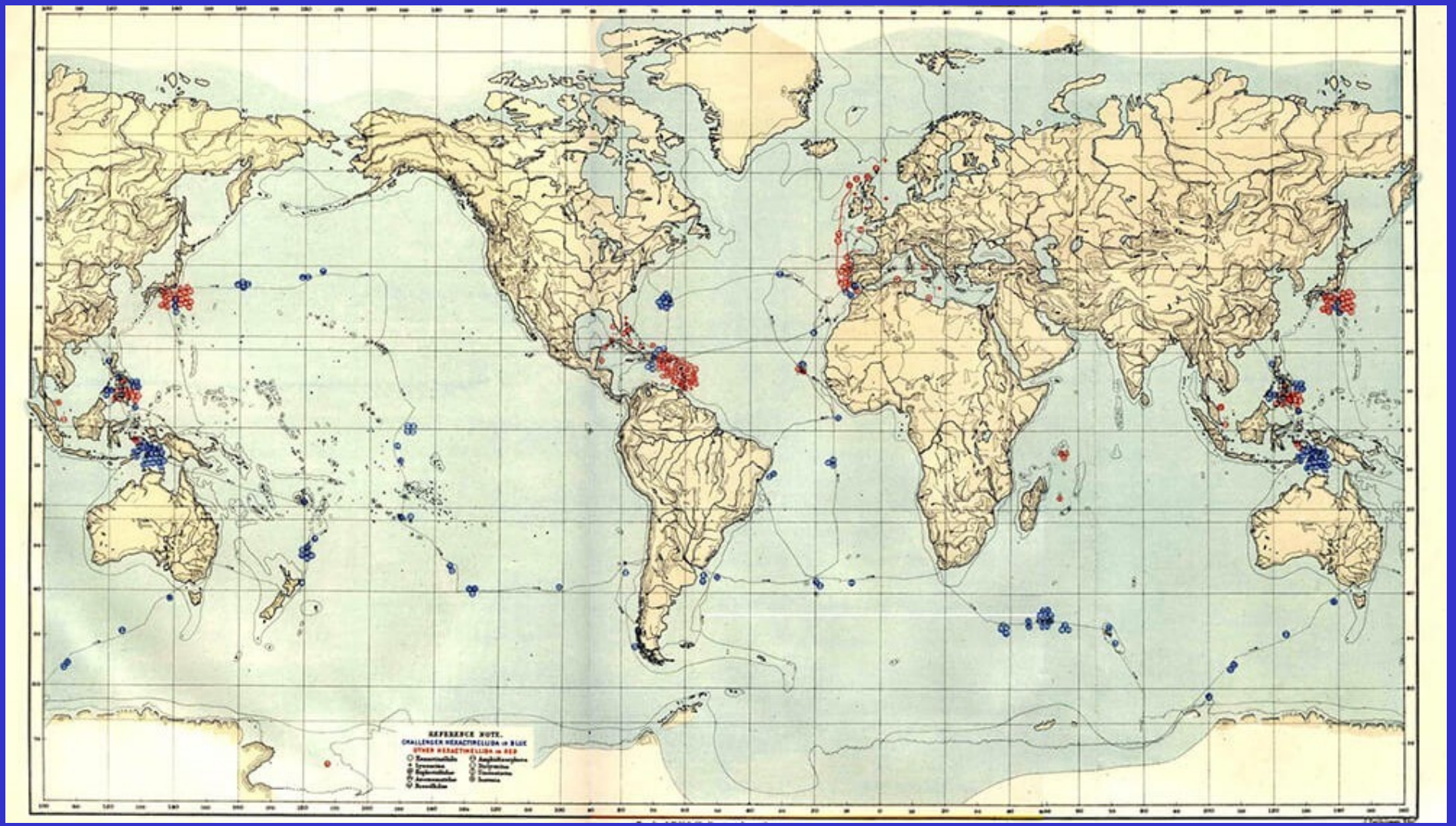


Massive Fe-Mn crusts



La spedizione scientifica inglese HMS (His/Her Majesty's Ship) Challenger (1872-1876) raccolse i primi noduli nel 1873 e successivamente li individuò nei vari oceani

Spedizione Vega (1878–1880): geologo svedese Nordenskiöld esplorò il passaggio a nord-est e raccolse campioni nel mare di Kara

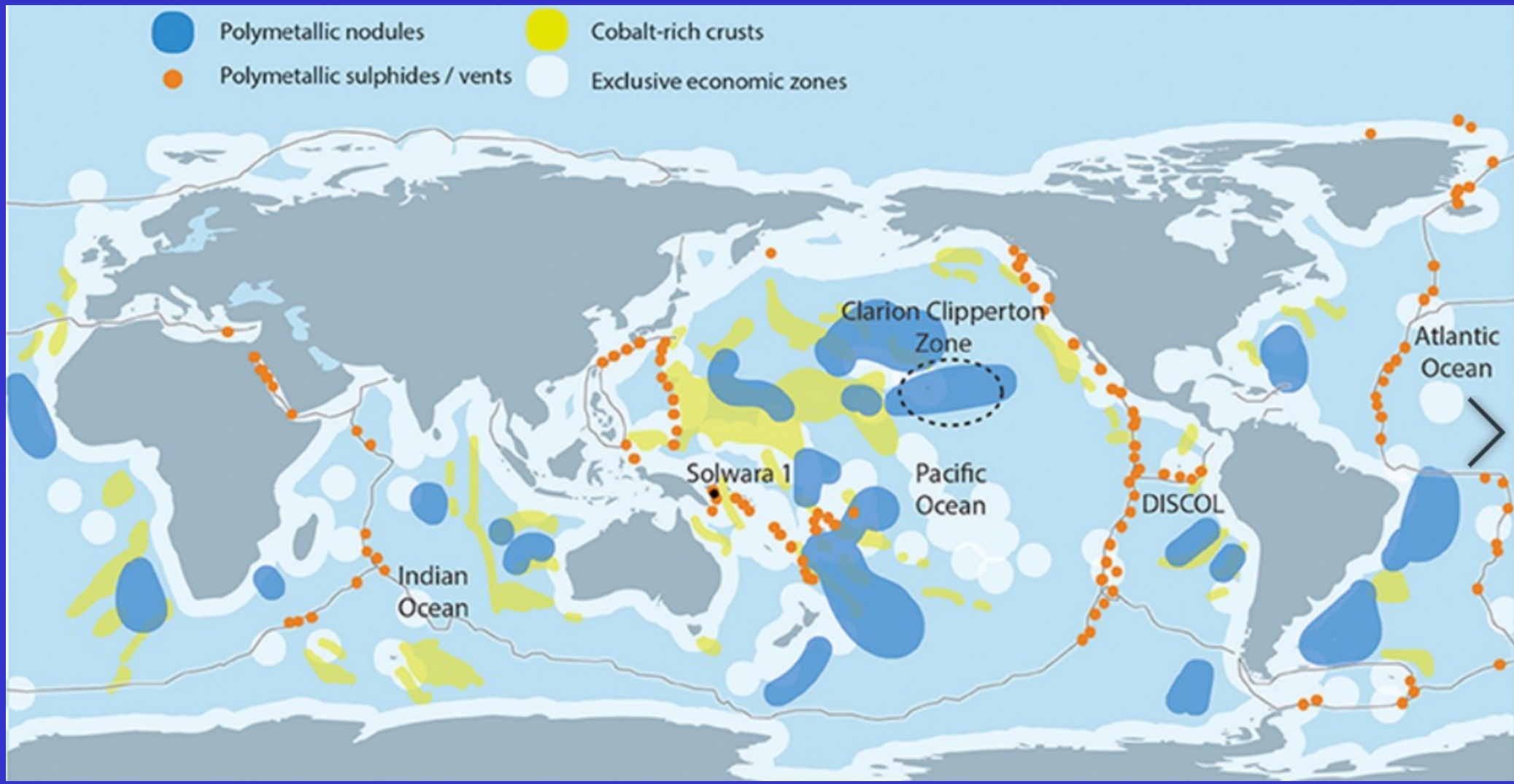


Le vere “croste cobaltifere” furono identificate soprattutto tra gli anni ’60 e ’80 dragaggi profondi sonar campionamenti in corrispondenza delle “seamounts” del Pacifico

Frank T. Manheim (George Mason Universiti Virginia)

Peter Halbach (Università di Berlino)

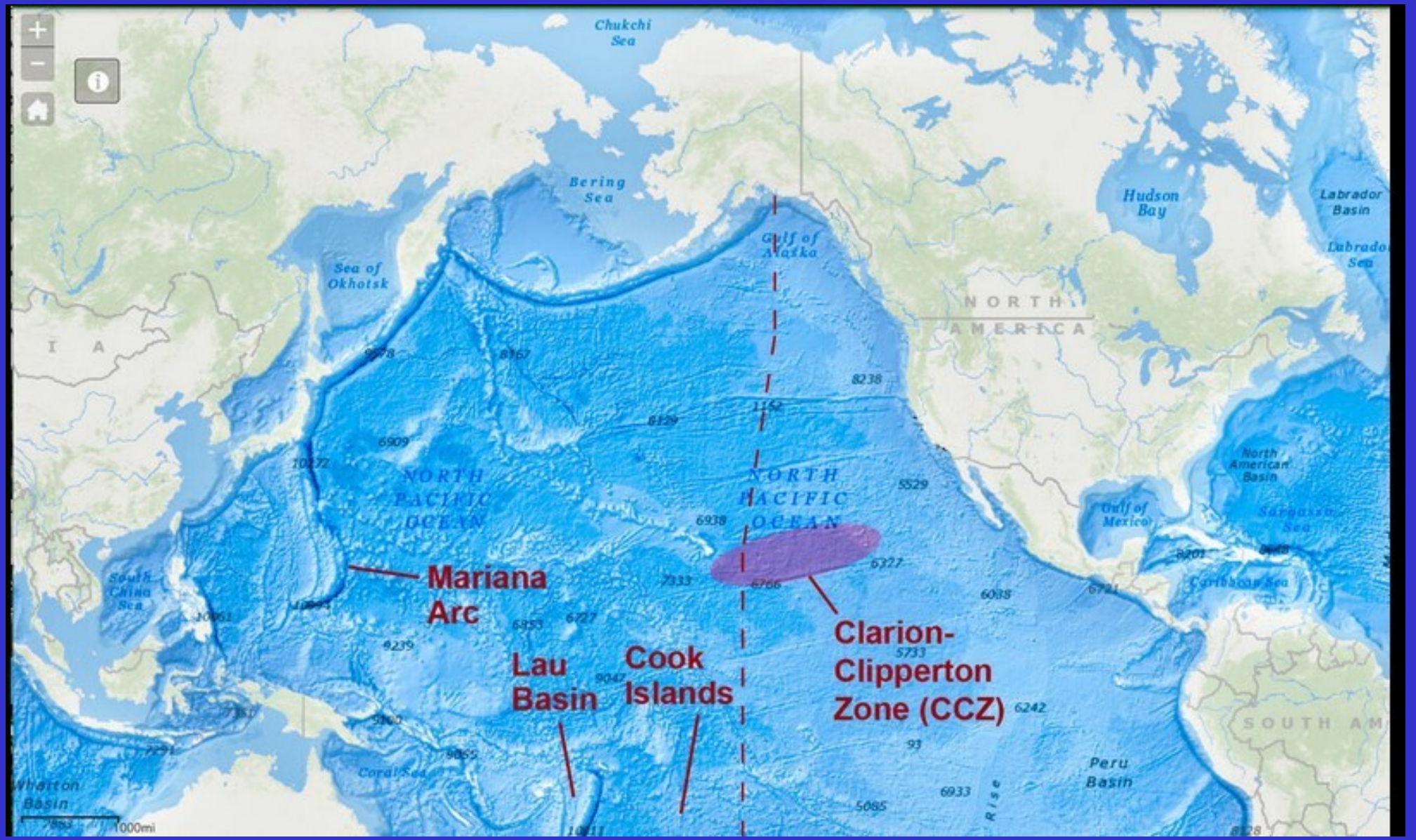
James R. Hein U. S. Geological Survey



Pacifico sud-orientale, al largo del Perù **Oceano Indiano centrale** **Pacifico occidentale isole Cook**

Oceano Atlantico **Oceano Artico (concentrazioni minori)**

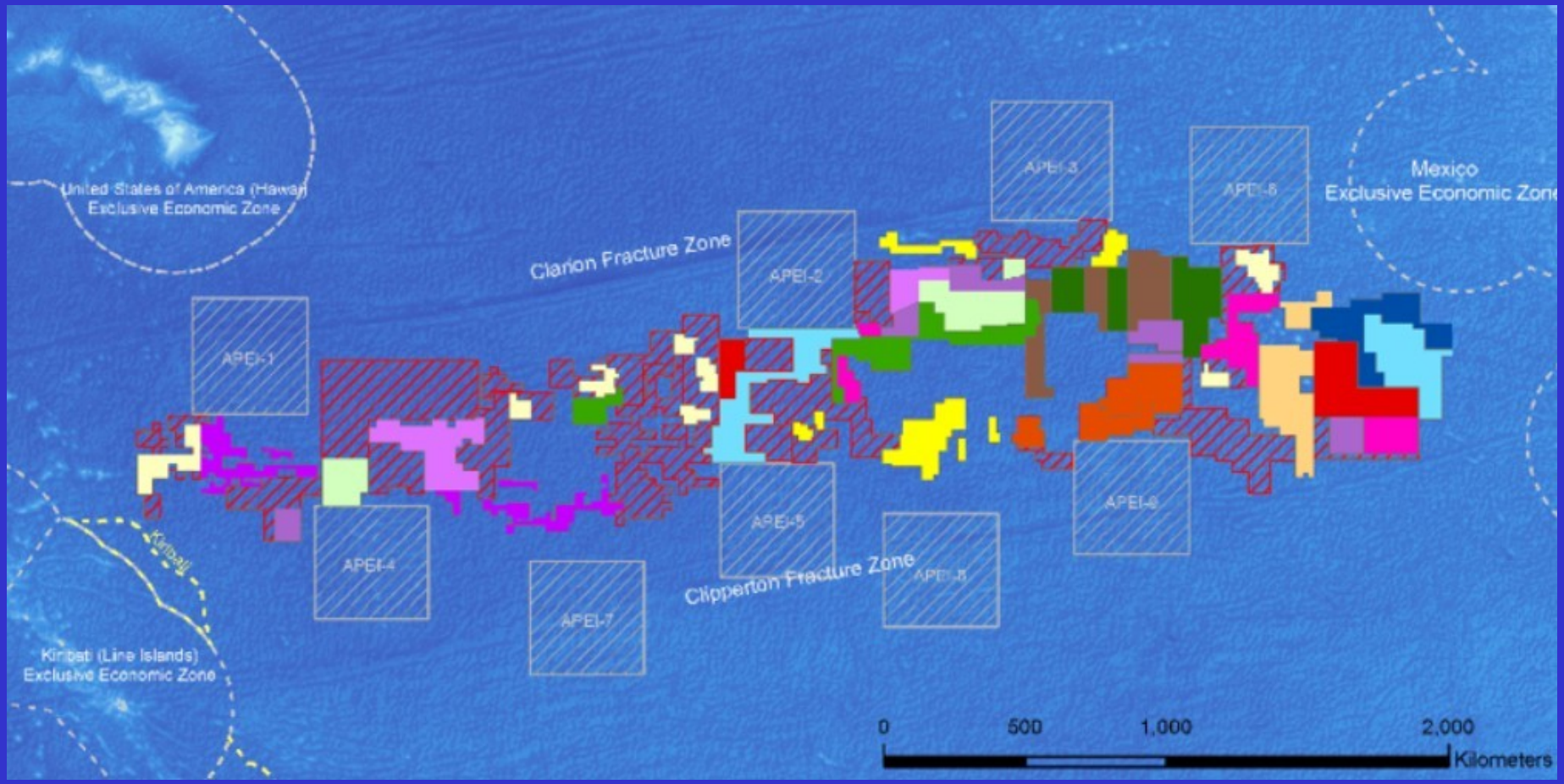
Esistono anche nel Mediterraneo ma rari piccoli (piccole aree e piccoli noduli) e di nessun valore economico più una curiositè geologica



Clarior Clipperton Zone → 4,5 milioni km² Unione Europea 4000 – 6000 m

Sedimenti fangosi coperti da noduli

20 miliardi di tonnellate di noduli **15 kg al m2**



L'ISA (International Seabed Authority),organismo ONU creato sotto la Convenzione sul diritto del mare (UNCLOS), regola le concessioni di ricerca ed esplorazione. 75.000 km² di area esplorativa per 15 anni

Dati circa 15 – 20 concessioni a Cina Corea del Sud India Russia Francia e Germania, ecc 43% resterebbe intatto per mandenere la biodiversità

Negli **anni '60 e '70**, grandi consorzi multinazionali sostenuti da compagnie minerarie e petrolifere di Stati Uniti, Giappone ed Europa investirono centinaia di milioni di dollari in test pilota (Shell, BP, Rio Tinto, ecc..) Furono recuperate **tonnellate di noduli** da profondità superiori ai 5.500 metri e sperimentati **processi metallurgici** per estrarre nichel, rame e cobalto.

The Metals Company nel **2022** ha effettuato uno dei più importanti test integrati moderni nella zona Clarion-Clipperton Il sistema ha raccolto migliaia di tonnellate di noduli da oltre 4.000metri di profondità.

Global Sea Mineral Resources (GSR), ha sperimentato il robot sottomarino per la raccolta dei noduli nel Pacifico nel **2021**.

Impossible Metals, che sta sviluppando sistemi robotici selettivi per raccogliere noduli riducendo l'impatto ambientale; sono previsti test industriali nell'area CCZ in collaborazione con l'istituto geologico tedesco BGR.

Il progetto europeo **Blue Nodules Project**, finanziato dall'UE, che ha sviluppato e collaudato tecnologie complete di raccolta, trasporto verticale e trattamento dei noduli, inclusi veicoli subacquei come "Apollo II".

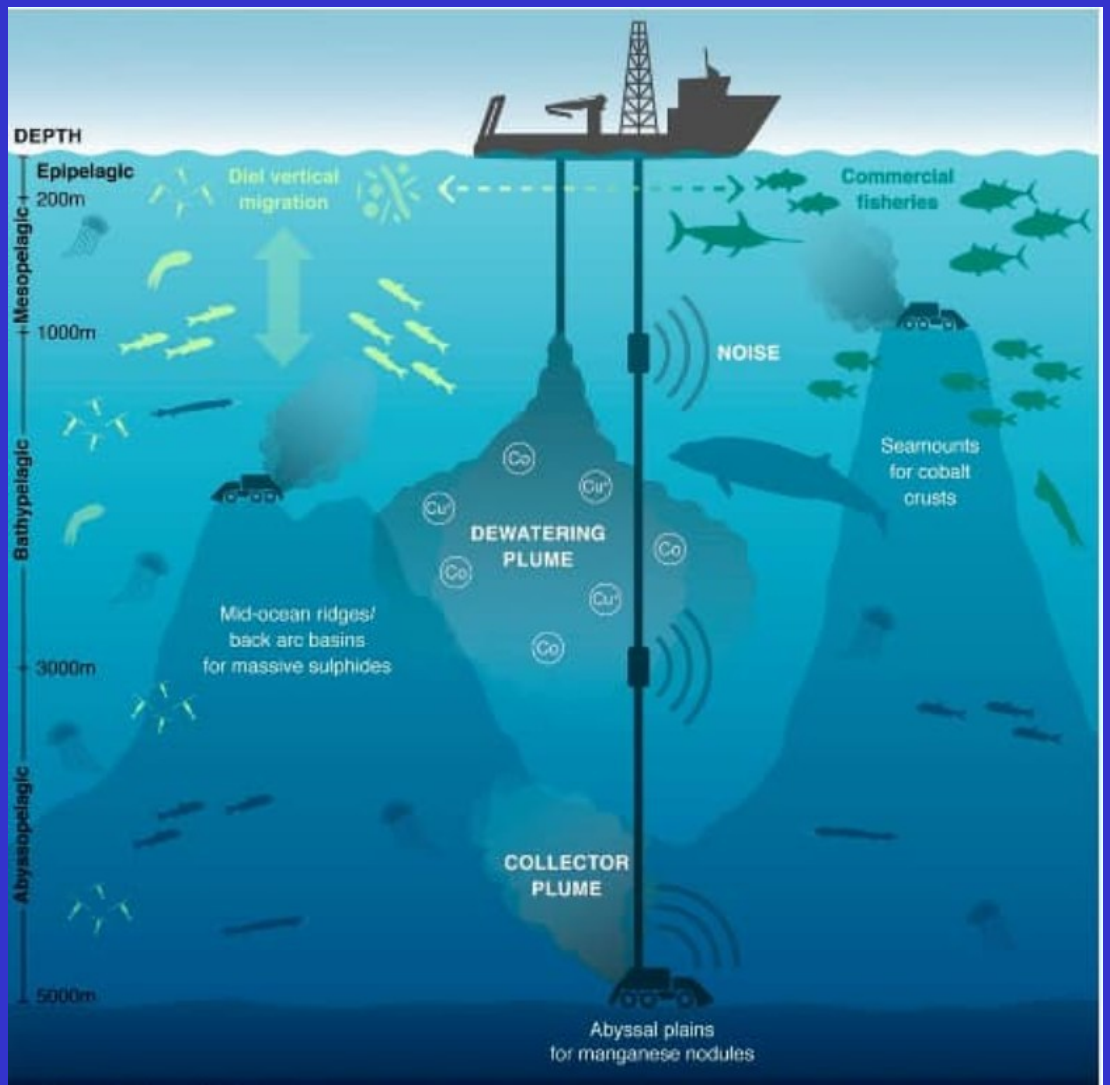
Giappone nel **2026** effettuato un test per estrarre sedimenti ricchi di metalli critici (disprosio ittrio) a una profondità record di circa 5.600 metri nelle acque intorno all'isola di Minami Torishima (SE oceano pacifico)

Difficile che per i prossimi 20 ci sia un'estrazione commerciali dei noduli

Veicoli cingolati (“collectors”) telecomandati Riser pipe verticale

pompe idrauliche; sistemi ad aria compressa (“air lift”);

Fondale → collector → tubo verticale → nave



La nave controlla i robot separa acqua e sedimenti dai noduli;

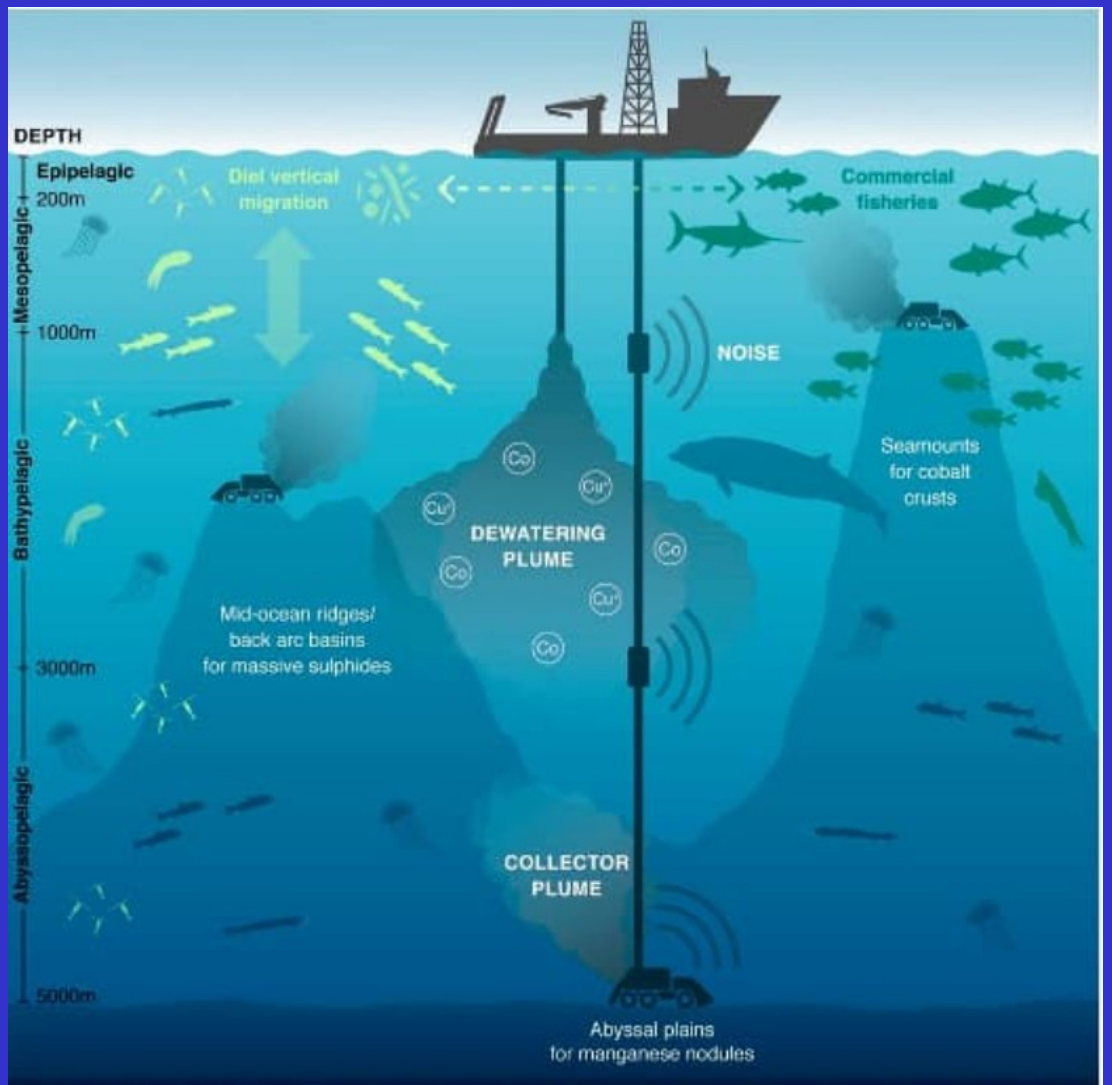
Trasporto su altra nave i noduli lavorati a terra

Difficoltà costi di sfruttamento:
pressione estrema (fino a ~600 atmosfere);
corrosione marina;
usura delle pompe;
gestione dei sedimenti;
consumo energetico elevato;
comunicazioni lente con i robot.

Estrazione più complcata su pendii ripidi di montagne sottomarine spessore sottile (pochi cm)

Bracci robotici, frese rotanti, sistemi idraulici o meccanici che "raschiano" la superficie del monte sottomarino.

Fondale → riser system tubi verticali → nave



Trasporto su altra nave

Trattamento a terra

frantumazione,

Separazione magnetica o Gravitazionale,
trattamenti chimici (lisciviazione acida) per sciogliere i metalli. ù
Raffinazione
I metalli vengono separati tramite processi elettrochimici o solventi specifici (Co Ni Terre rare ecc)

Noduli polimetallici

Estrazione + trasporto: ~3.000 – 6.000 $ per tonnellata di materiale secco

Valore stimato metalli: ~6.000 – 10.000 $/tonnellata

Croste di cobalto

~5.000 – 15.000 $ per tonnellata estratta

Valore: ~8.000 – 15.000 $/tonnellata in quanto più ricchi di Co

Caratteristica	Noduli polimetallici	Croste di cobalto
Posizione	Sul fondale	Attaccate alla roccia
Difficoltà estrazione	Bassa-media	Alta
Tecnologia	Raccolta/aspirazione	Fresatura robotica
Impatto ambientale	Alto	Molto alto localizzato
Interesse industriale	Molto alto	Alto ma più limitato

Danni ambientali:

distruzione degli habitat abissali;
nuvole di sedimenti (“sediment plumes”);
rumore subacqueo;
danni a specie sconosciute (Nella Clarion-Clipperton Zone, i**ndividuate 5000 specie animali** finora completamente sconosciute;
alterazione di ecosistemi **lentissimi a rigenerarsi**

Per questo diversi Paesi e gruppi scientifici chiedono una pausa o una regolamentazione più severa da parte della International Seabed Authority.

Danni ambientali:

Lo sfruttamento delle croste di cobalto è uno dei tipi di estrazione marina con il maggiore impatto ambientale potenziale: avviene su ecosistemi profondi molto fragili e lentissimi a rigenerarsi.

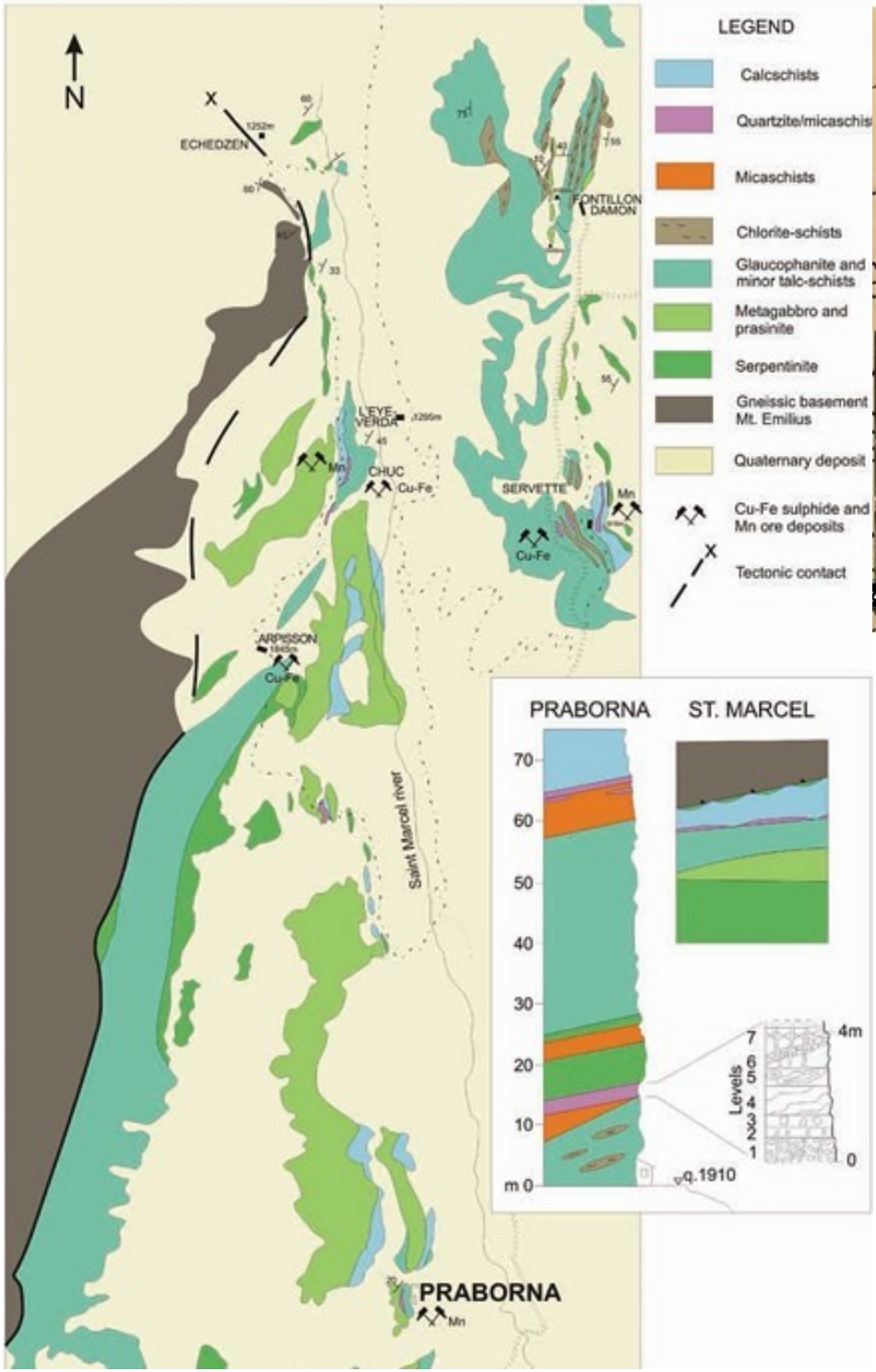
Le croste crescono sui fianchi dei monti sottomarini (seamounts), dove vivono: coralli profondi, spugne, echinodermi, organismi filtratori molto antichi.

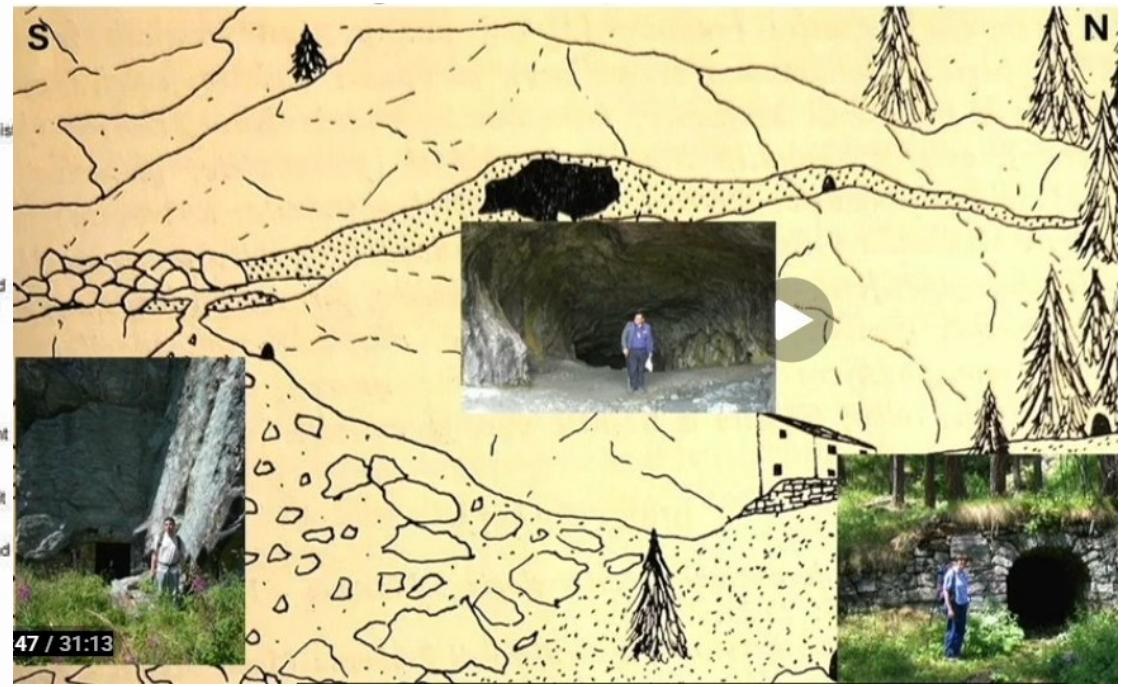


Problemi di *geopolitica*

Se questi campi sono al di fuori delle acque territoriali appartengono in teoria a tutti oppure a “nessuno” quindi di chi va a raccoglierli?

Antartide non è di nessuno ma di tutti, **almeno per ora...**





Il giacimento di **Mn** si trova in un livello di **quarzite** all'interno di rocce oceaniche (Metabasalti, metagabbri, ecc..)
Braunite "Sapone dei Vetrai"
Piemontite

Il modello delle terre rare (REE) della roccia in massa suggerisce un apporto **idrogenico del 20% e idrotermale dell'80%** nel proto-minerale.

Il metamorfismo alpino ha in gran parte trasformato i sedimenti originari





Quarziti valle Sain Marcel Sedimenti sabbiosi piane abissali





Alurgite



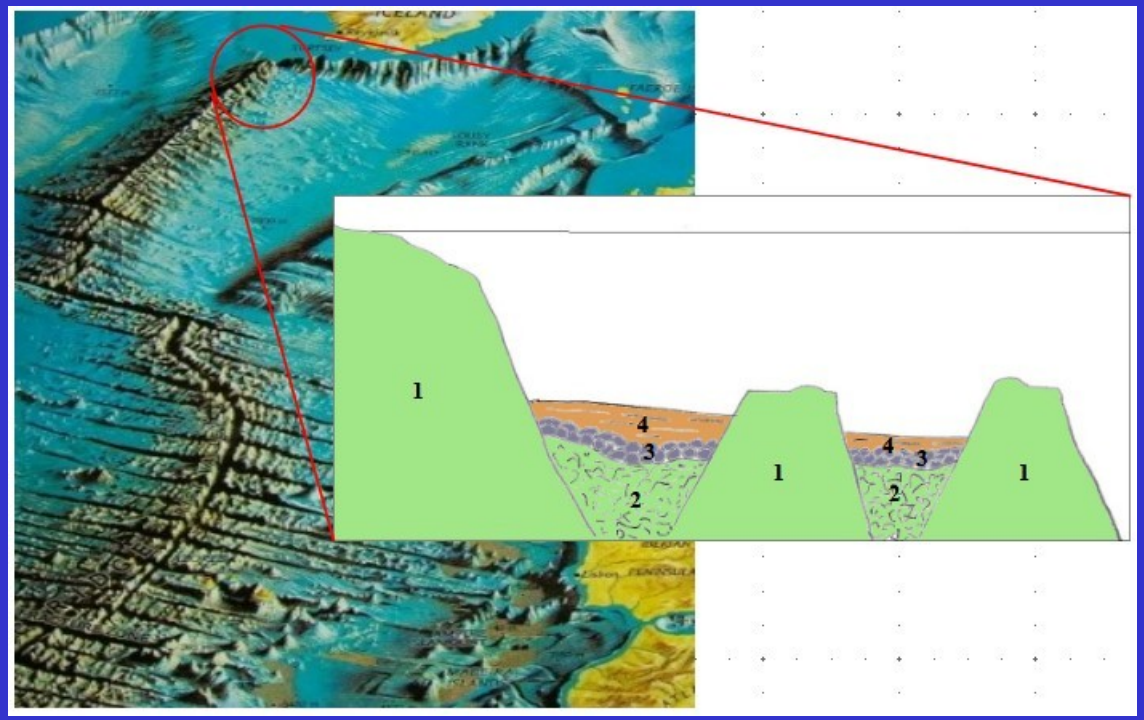
Piemontite



Violano



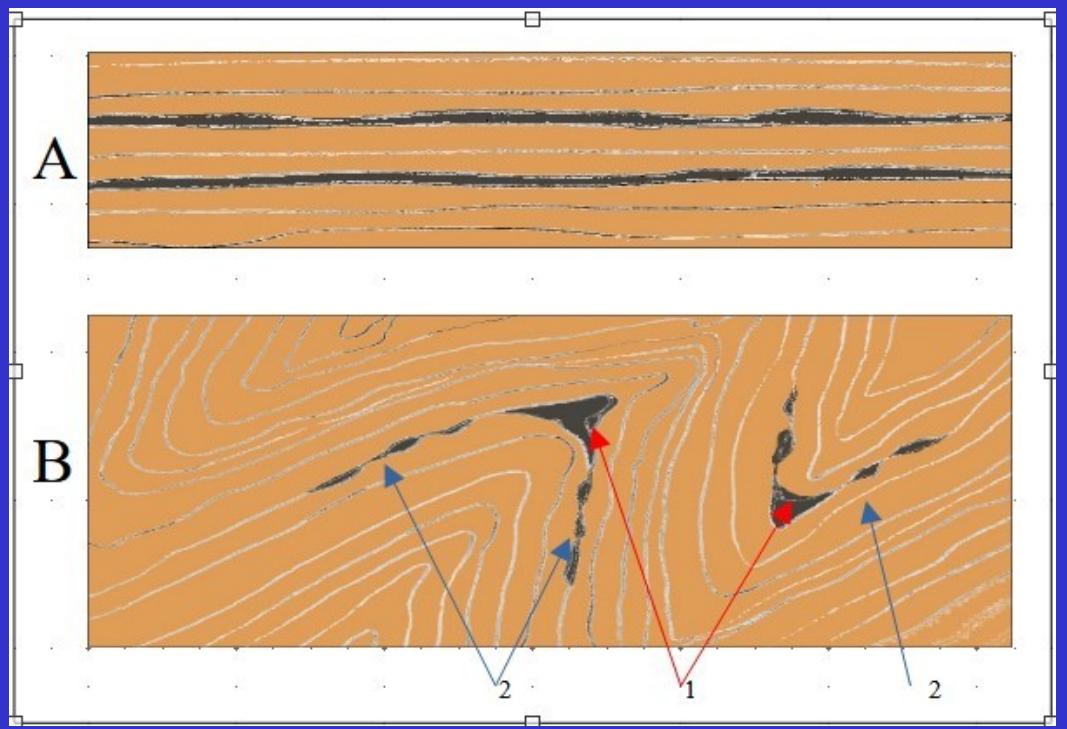
Braunite



Manganese Diaspri Gambatesa
Giurassico 160 - 150 MA

Sedimenti probabilmente si raccolsero delle depressioni dell'accidentata morfologia del fondo oceanico,

1) ofioliti
2) Brecce poligeniche eserpentinitiche
3) Basalti (pillows)
4) Diaspri



A) Mineralizzazioni stratiformi
Straterelli poco potenti
Concentrazione media 15 – 20 %

B) Mineralizzazioni massicce o a boudin
Livelli mineralizzati 50 m di lunghezza e i 30 metri di spessore
Concentrazione media 30 – 35 %

Mineralizzazioni filoniane

Braunite, Pirolusite Hausmannite, Manganite, Piemontite

Prima fase della mineralizzazione a manganese è collegabile a processi idrotermali

Seconda fase, fenomeni di risedimentazione che provocarono un frazionamento gravitativo di ossidi e idrossidi di manganese

Terza fase movimenti orogenetici provocarono ulteriori ricristallizzazioni, mobilitazioni ed ispessimenti dei livelli mineralizzati

Nelle Alpi sono noti diversi affioramenti di:
Calcari e radiolariti giurassiche contenenti concentrazioni di manganese;

Livelli manganesiferi associati a sedimenti pelagici profondi;

Croste ferromanganesifere e piccole concrezioni che testimoniano lunghi periodi di sedimentazione molto lenta.

I noduli alpini sono generalmente:
molto più **piccoli** e **meno abbondanti** dei grandi noduli polimetallici dei fondali oceanici moderni;
spesso **deformati** o **metamorfosati** dai processi che hanno portato alla formazione delle Alpi;
conservati in **affioramenti limitati**.