

La Geochimica*

La geochimica è la scienza che si occupa della costituzione chimica del globo terrestre e determina la distribuzione e la frequenza, nello spazio e nel tempo, degli elementi che lo compongono, allo stato libero o in combinazione.

Ovvero, la geochimica studia la «storia» degli elementi chimici del globo terrestre e il loro comportamento nelle differenti condizioni naturali termodinamiche e chimico-fisiche.

Le conoscenze dirette sulla composizione chimica e sui processi di trasformazione sono limitate a un certo spessore della crosta terrestre comprendente **litosfera** (parte solida), **idrosfera** (parte liquida), **atmosfera** (parte aeriforme) e **biosfera** (materia vivente).

Si potrà parlare, quindi, di **litogeochimica**, **idrogeochimica**, **atmogeochimica** e **biogeochimica**.

* Termine coniato dal chimico e mineralogista Christian Friederich Schoenbein (1799-1868) nel 1838

I risultati delle ricerche del norvegese **Victor Moritz Goldschmidt (1888-1947)** e di numerosi ricercatori russi rappresentano un punto di riferimento per tutte le branche della moderna geochimica.

Il Goldschmidt fu anche il primo ricercatore che propose una **classificazione completa degli elementi chimici** sulla base delle loro caratteristiche e del loro comportamento, completando in termini geochimici la classificazione di **Dimitrij Mendeleev (1834-1907)**, il padre della tabella periodica degli elementi.

Dopo la seconda guerra mondiale i metodi geochimici hanno subito una estensione nelle applicazioni ed un approfondimento delle conoscenze e delle tecnologie talmente vasto che ha prodotto una diversificazione di questa scienza in diverse branche, ad esempio:

Geochimica Inorganica

Geochimica Organica

Geochimica Isotopica

Biogeochimica

Geochimica Ambientale

GOLDSCHMIDTTM
Chicago 2024
18-23 August



My Goldschmidt

Welcome to Goldschmidt2024!

Goldschmidt is the foremost annual, international conference on geochemistry and related subjects, organized by the **Geochemical Society** and the **European Association of Geochemistry**.

Please [sign up](#) to receive email updates for this meeting.

<https://conf.goldschmidt.info/goldschmidt/2024/meetingapp.cgi>

Geochimica Ambientale:

è una branca della geochimica che studia l'abbondanza, distribuzione e comportamento degli elementi chimici nelle sfere geochimiche di superficie:

atmosfera

- particolato atmosferico
- CO₂, CO, NO_x, ecc...
- IPA

pedosfera

- suolo

idrosfera

- acque superficiali
- acque sotterranee
- precipitazioni atmosferiche

biosfera

- piante
- organismi animali

litosfera

- rocce
- sedimenti

Gli elementi chimici

- Conosciuti fino dall'antichità:
oro, argento, rame, ferro, piombo, stagno, mercurio, zolfo e carbonio.
- **Arsenico, antimonio, bismuto, fosforo e zinco** vennero scoperti dagli alchimisti durante il medioevo.
- Nel corso del XVIII sec. vennero scoperti alcuni importanti elementi gassosi (**azoto, ossigeno, idrogeno e cloro**) e diversi metalli (tra cui **platino, nichel, manganese, uranio, cromo e titanio**).
- All'inizio del XIX sec., grazie all'impiego dell'elettrolisi, vennero scoperti altri sei importanti elementi metallici (**potassio, sodio, calcio, magnesio, bario e stronzio**).
- Intorno al 1850 si conoscevano circa 50 elementi !

Gli elementi chimici

Quanti elementi rimanevano da scoprire?

Come classificare gli elementi?

Il primo criterio utilizzato fu quello del *peso atomico (numero di massa)*.

Risultati più interessanti si ottennero invece raggruppando gli elementi in base a *proprietà chimiche simili*.

Nel 1869, il chimico russo **Dimitri I. Mendeleev (1834 – 1907)** ordinò gli elementi allora conosciuti (63!) in una tabella formata da righe orizzontali, chiamate *periodi*, e colonne verticali dette *gruppi*.

Successivamente alla scoperta dei *numeri atomici (Z)*, tale classificazione fu perfezionata ed i vari elementi vennero classificati secondo il *numero atomico crescente*: si arrivò in questo modo alla moderna tavola periodica degli elementi.

Gli elementi chimici

- 98 elementi chimici naturali identificati nell'universo
- 98 elementi chimici naturali presenti sulla Terra ($Z = 1 - 83$ elementi sia stabili che radioattivi) di cui $Z > 83$ elementi radioattivi
- Il **Tecnezio**, il **Promezio** e i primi 6 elementi transuranici, cioè **Nettunio**, **Plutonio**, **Americio**, **Curio**, **Berkelio** e **Californio**, un tempo ritenuti artificiali in quanto sintetizzati artificialmente, sono stati invece rinvenuti in ultratracce in materiali uraniferi
- 118 elementi in totale, includendo quelli trovati con reazioni chimiche artificiali o nucleari

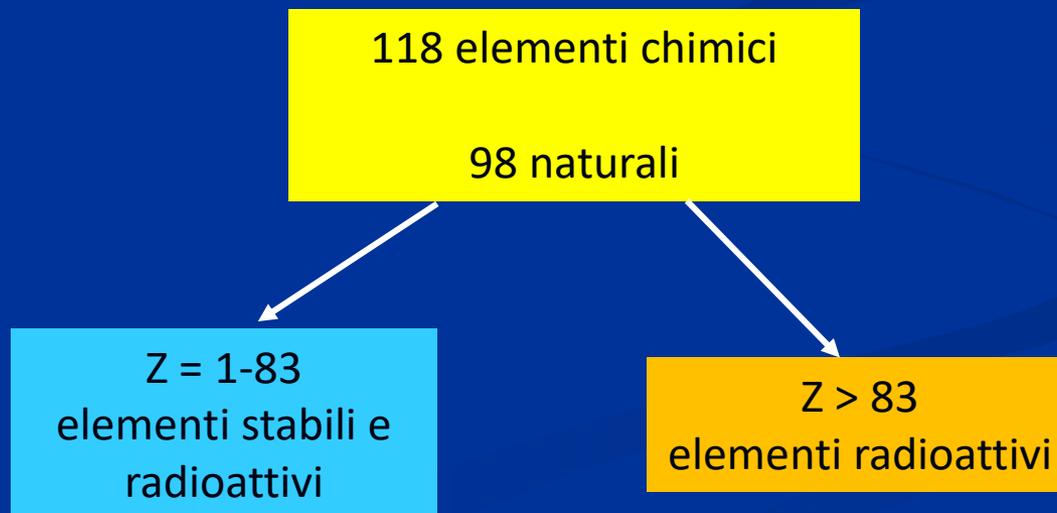


TABELLA PERIODICA DEGLI ELEMENTI

gruppi →

	I A		II A										III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII A	
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg	III B	IV B	V B	VIB	VII B	VIII B			IB	II B	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Af	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	

↓ periodi

- orbitale s
- orbitale p
- orbitale d
- orbitale f

lantanidi	56 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
attinidi	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

WWW.ANDREAMININI.ORG

Gruppi: stessa configurazione elettronica esterna (s, p, d, f) e comportamento simile
 Periodi: diversi livelli energetici occupati dall'atomo non eccitato

Tavola Periodica degli elementi

1	IA																	18	VIIIA
1	1,0079																	2	4,0026
1	0,000899																	0	0,0001785
	-259,2																	0	-272,1
	-253																	0	-269
	H																		He
	Idrogeno																		Elio
2	3	4															10	20,179	
	6,941	9,0122															0	-	
	0,534	1,85															0	0,0009	
	186,1	1282,2															0	-248,9	
	1324	2472															0	-246	
	Li	Be															F	Ne	
	Litio	Berillio															Fluoro	Neon	
3	11	12															18	39,948	
	22,9898	24,305															0	-	
	0,97	1,74															0	0,001783	
	97,7	850															0	-248,9	
	883	1090															0	-186	
	Na	Mg															Cl	Ar	
	Sodio	Magnesio															Cloro	Argon	
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
	39,0983	40,08	44,9559	47,9	50,9415	51,996	54,938	55,847	58,9332	58,7	63,546	65,38	69,72	72,59	74,9216	78,96	79,904	83,8	
	0,86	1,55	3,02	4,5	5,98	7,41	7,88	8,71	8,88	8,96	7,1	5,93	5,46	5,73	4,82	0,007139	0,00368	0,00199	
	82,8	848,9	1538,9	1690	1843,3	1245	1538,9	1495	1455	1083	419,4	2247	297	957,8	220	220	-7,2	-168,9	-153
	758	1484	2811	3208	2672	2062	2862	2928	2862	2566	911	2247	2834	679	679	58	58	-186	-186
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
	Potassio	Calcio	Scandio	Titanio	Vanadio	Cromo	Manganese	Ferro	Cobalto	Nichel	Rame	Zinco	Gallio	Germanio	Arsenico	Selenio	Bromo	Kriptone	
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
	85,4678	87,62	88,9059	91,22	92,9064	95,94	(98)	101,07	102,9055	106,4	107,868	112,41	114,82	118,69	121,75	127,6	126,9045	131,3	
	1,53	2,56	3,8	4,5	5,87	10,22	11,5	12,1	12,44	12,16	10,49	8,65	7,28	7,3	6,62	6,25	4,94	0,00585	
	38,9	769,9	183	164	215,9	4610	4119	4119	2964	2964	2163	307,9	196,4	207,2	1587	448,9	113,3	-111	
	894	1375	3338	409	4744	4610	4119	4119	3727	3727	2163	767	2070	2623	988	988	183	-111	
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
	Rubidio	Stronzio	Ittrio	Zirconio	Niobio	Molibdeno	Tecnezio	Rutenio	Rodio	Palladio	Argento	Cadmio	Indio	Stagno	Antimonio	Tellurio	Iodio	Xenone	
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
	132,9054	137,33	138,9055	178,49	180,9479	183,85	186,207	190,2	192,22	195,09	196,9665	200,59	204,37	207,2	208,9804	(209)	(210)	(222)	
	1,87	3,5	6,15	13,3	16,6	19,3	21,82	22,5	22,42	19,3	13,5458	11,86	11,34	9,78	9,32	302	0,005		
	28,5	704,4	835	2128,4	3909,9	3167,2	2704,4	2453,9	2453,9	1773,5	1063	-38,9	302,8	327,4	271,3	253,9	302	-71	
	882	2125	3457	4603	5365	5555	4987	4389	4389	2808	2808	357	1487	1750	1564	947	335	-62	
	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
	Cesio	Bario	Lantanio	Afnio	Tantalio	Tungsteno	Renio	Osmio	Iniridio	Platino	Oro	Mercurio	Tallio	Piombo	Bismuto	Polonio	Astato	Radone	
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112							
	(223)	226,025	227,028	(261)	(262)	(266)	(264)	(277)	(268)	(271)	(272)	(285)							
	27	8	19,07																
	874	704,4	1049,9																
		1527	3200																
	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn							
	Francio	Radio	Attinio	Rutherfordio	Dubnio	Seaborgio	Bohrio	Hassio	Meitnerio	Darmstadio	Roentgenio	Copernicio							

- Metalli Alcalini
- Metalli Alcalino-Terrosi
- Lantanidi
- Attinidi

- Elementi di Transizione
- Metalloidi / Non Metalli
- Alogeni
- Gas Nobili

Numero Atomico
Valenza
Densità (g/cm³)
Temp. Fusione (°C)
Temp. Ebollizione (°C)

Peso Atomico
Numero di Ossidazione
Simbolo
Nome

1
0,000899
-259,2
-253
H
Idrogeno

STATI di AGGREGAZIONE a 20 °C

SOLIDI LIQUIDI GASSOSI ARTIFICIALI

6	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	140,12	140,9077	144,24	(145)	150,4	151,96	157,25	158,9254	162,5	164,9304	167,26	168,9342	173,04	174,967
	6,9	6,48	6,6	7,22	7,75	5,24	7,9	8,23	8,55	8,7	9,07	9,32	9,67	9,84
	793,3	830,9	1015,9	1080	1071,9	826	1311,9	1356,9	1407	1469,9	1497	1544,9	1623,9	1662,9
	3426	3512	3698	2480	1791	1567	3286	3223	2562	2895	2863	1947	1194	3395
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	Cerio	Praseodimio	Neodimio	Promezio	Samario	Europio	Gadolonio	Terbio	Disprosio	Olmio	Erbio	Tulio	Itterbio	Lutezio
7	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	232,0381	(209)	238,029	237,048	(244)	(243)	(247)	(247)	(251)	(252)	(257)	(258)	(259)	(260)
	11,3	18,7	20,25	19,84	13,67	13,57	13,51	13,51	13,51	13,51	13,51	13,51	13,51	13,51
	1842,2	1560	238,029	238,029	244,064	244,064	247,070	247,070	251,085	252,083	257,105	258,105	259,108	260,106
	4788	1527	3200	3200	2814	2814	2814	2814	2814	2814	2814	2814	2814	2814
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
	Torio	Protoattinio	Uranio	Nettunio	Plutonio	Americio	Curio	Berchelio	Californio	Einsteinio	Fermio	Mendelevio	Nobelio	Laurenzio

Serie dei Lantanidi

Serie degli Attinidi

La Tabella Periodica degli elementi chimici - 1

Ad una data posizione corrisponde un determinato comportamento chimico dell'elemento definito da diverse proprietà «periodiche»

1) Configurazione elettronica esterna

Gli elementi appartenenti allo stesso gruppo hanno la stessa configurazione elettronica esterna, anche se l'ultimo livello energetico è diverso.



Mostrano comportamento chimico simile

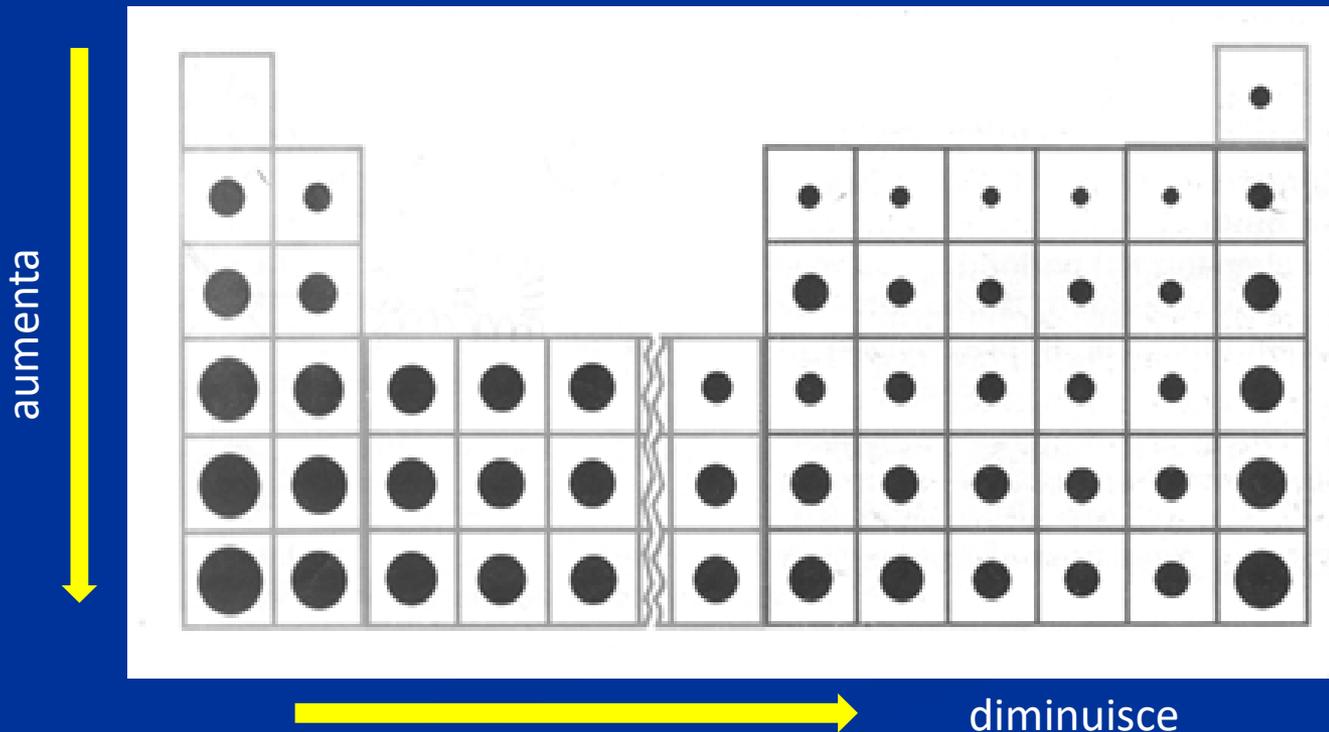
Gruppo VII			
Fluoro	$2S^2$	$2P^5$	HF
Cloro	$3S^2$	$3P^5$	HCl
Bromo	$4S^2$	$4P^5$	HBr
Iodio	$5S^2$	$5P^5$	HI

La Tabella Periodica degli elementi chimici – 2/1

Ad una data posizione corrisponde un determinato comportamento chimico dell'elemento determinato da:

2) Raggio atomico (volume atomico)

Aumenta verso il basso nei gruppi mentre diminuisce procedendo da sinistra a destra nei periodi



La Tabella Periodica degli elementi chimici – 2/2

Tutto in natura tende spontaneamente verso la maggiore stabilità.

Tutti gli elementi reagiscono e formano legami per raggiungere la **configurazione elettronica esterna ottimale**:

8 elettroni nell'ultimo livello energetico, nS^2, nP^6 → la Regola dell'otteto

Gli elementi che possiedono 8 elettroni superficiali (configurazione ottimale) risultano particolarmente stabili o inerti, nel senso che manifestano pochissima tendenza a reagire con altri elementi chimici.



I gas nobili

He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn

La Tabella Periodica degli elementi chimici – 2/3

Se l'atomo cede elettroni assume una carica positiva e si trasforma in uno ione positivo o catione.

Se invece l'atomo acquista elettroni assume una carica negativa, diventando uno ione negativo o anione.

Per quale motivo un atomo dovrebbe cedere o acquistare degli elettroni?

Per raggiungere l'ottetto o comunque la configurazione elettronica del gas nobile più vicino.

gruppo	Ioni monoatomici	gruppo	Ioni monoatomici
I°	Cationi monovalenti (Na ⁺ ; K ⁺ ecc.)	V°	raramente cationi trivalenti (Bi ³⁺) o anioni trivalenti (N ³⁻)
II°	cationi bivalenti (Mg ²⁺ ; Ca ²⁺ ecc.)		
III°	cationi trivalenti (Al ³⁺)	VI°	anioni bivalenti (O ²⁻ ; S ²⁻)
IV°	cationi tetravalenti (Sn ⁴⁺ ; Pb ⁴⁺)	VII°	anioni monovalenti (Cl ⁻ ; F ⁻ ; ecc.)

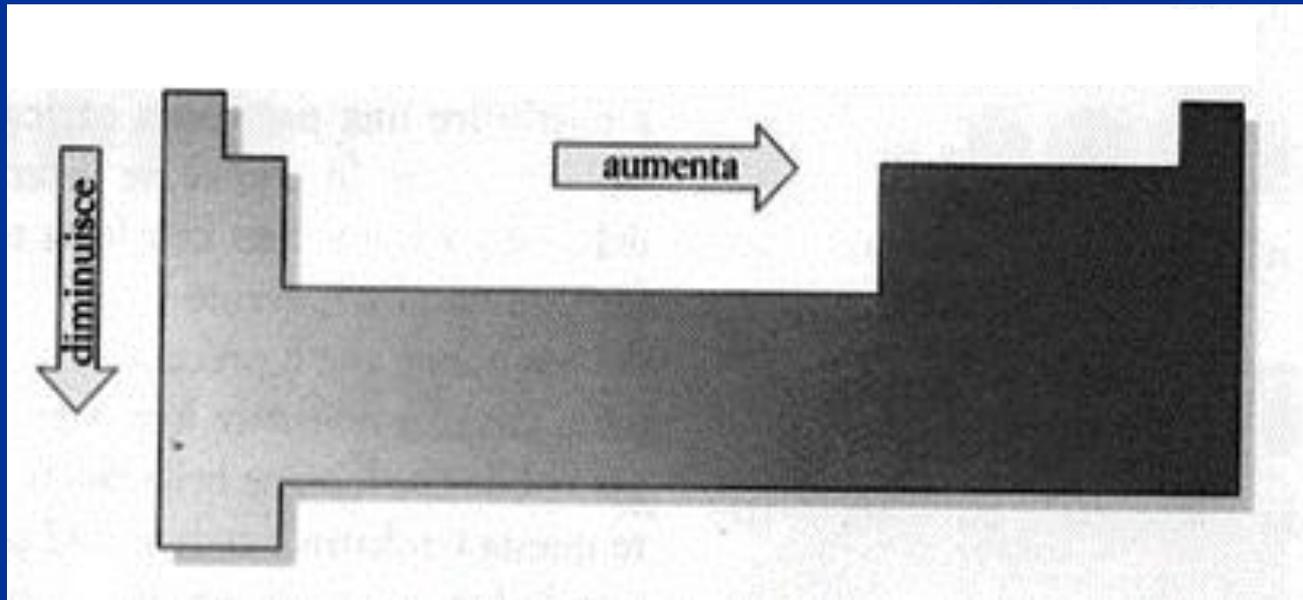
La Tabella Periodica degli elementi chimici - 3

Ad una data posizione corrisponde un determinato comportamento chimico dell'elemento determinato da:

3) Energia di ionizzazione

Fornita all'atomo per «strappare» un elettrone esterno e ionizzarsi (cationi).

Aumenta dal basso verso l'alto nei gruppi (max per raggi atomici piccoli) e da sinistra verso destra nei periodi (max per i gas nobili)



La Tabella Periodica degli elementi chimici - 4

Ad una data posizione corrisponde un determinato comportamento chimico dell'elemento determinato da:

4) Elettronegatività

Tendenza ad attrarre elettroni di legame.

Aumenta dal basso verso l'alto nei gruppi e da sinistra a destra nei periodi (valori > in alto a dx, valori < in basso a sx)

	I								
1	2.1	II							
2	1.0	1.5						III	IV
3	0.9	1.2						V	VI
4	0.8	1.0	1.3					VII	VIII
5	0.8	1.0	1.2					2.0	2.5
6	0.7	0.9	1.1					1.6	1.8
7	0.7	0.9	1.1					2.1	3.0
								1.6	1.8
								1.5	1.8
								1.9	1.8
								2.4	2.8
								2.1	2.5
								2.0	2.0

...gli atomi piccoli attraggono gli elettroni più fortemente di quelli grandi!

Aspetti ambientali della Tavola Periodica degli elementi

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Th	Pa	U	Np	Pu									

-  Elementi con valenza tossicologica non ben definita
-  Elementi tossici
-  Elementi potenzialmente tossici
-  Elementi tossici e radioattivi

L'abbondanza degli elementi chimici

Gli elementi chimici non hanno uguale abbondanza, sia che si consideri la sola terra oppure, in generale, tutto l'Universo.

Da dove arriva la conoscenza dell'abbondanza degli elementi chimici?

- 1) Analisi spettroscopiche dell'atmosfera solare, delle stelle e delle nebulose
- 2) Analisi della composizione media delle meteoriti
- 3) Analisi della composizione media delle rocce terrestri (e lunari)

L'abbondanza degli elementi chimici - 1

1) analisi spettroscopiche dell'atmosfera solare, delle stelle e delle nebulose

- Ogni corpo incandescente da origine ad uno spettro continuo.
- Ogni gas incandescente (a bassa P) produce un insieme di righe la cui posizione (lunghezza d'onda) e numero dipendono dalla natura chimica della sorgente luminosa.
- Se la luce proveniente da un corpo che emette uno spettro continuo passa attraverso un gas a bassa pressione, questo "sottrae" alcune lunghezze d'onda (righe di assorbimento o di Fraunhofer).

Gli spettri sono una specie di "impronte digitali" dei vari elementi chimici.

E' possibile dedurre la composizione chimica della sorgente e dei gas.

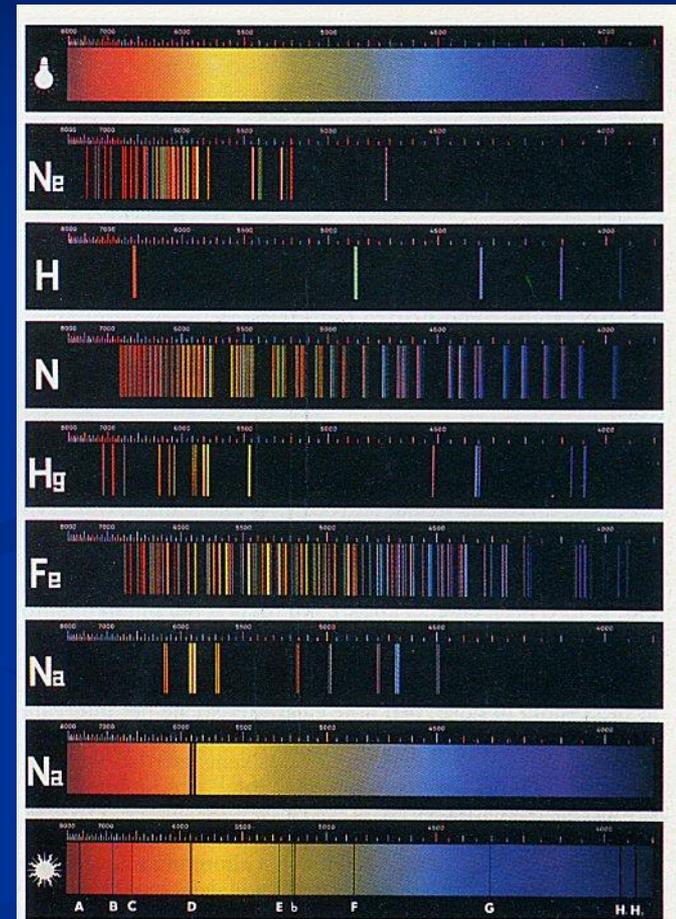


Fig. 1.8. Esempi di spettri. Dall'alto: spettro continuo (lampada a incandescenza); spettri di emissione (neon, idrogeno, azoto, mercurio, ferro, sodio); spettri di assorbimento (vapori di sodio, Sole). (Officine Galileo, Firenze)

Tenendo conto dei vari tipi spettrali dovuti alle diverse temperature e facendo una media di quanto risulta dagli innumerevoli spettri esaminati, si ricava per le stelle la seguente composizione chimica media:

- il 50-75% della loro materia è data da H,
- il 45-20% è composto di He,
- la parte rimanente (poco più del 5%) va attribuita a tutti gli altri elementi chimici che conosciamo

L'abbondanza degli elementi chimici - 2

2) analisi della composizione chimica delle meteoriti, delle rocce terrestri e del materiale lunare

Le rocce terrestri ed il materiale lunare rappresentano solo la parte più superficiale dei due corpi celesti.

Le meteoriti rappresentano, invece, i resti di materiale stellare indifferenziato.

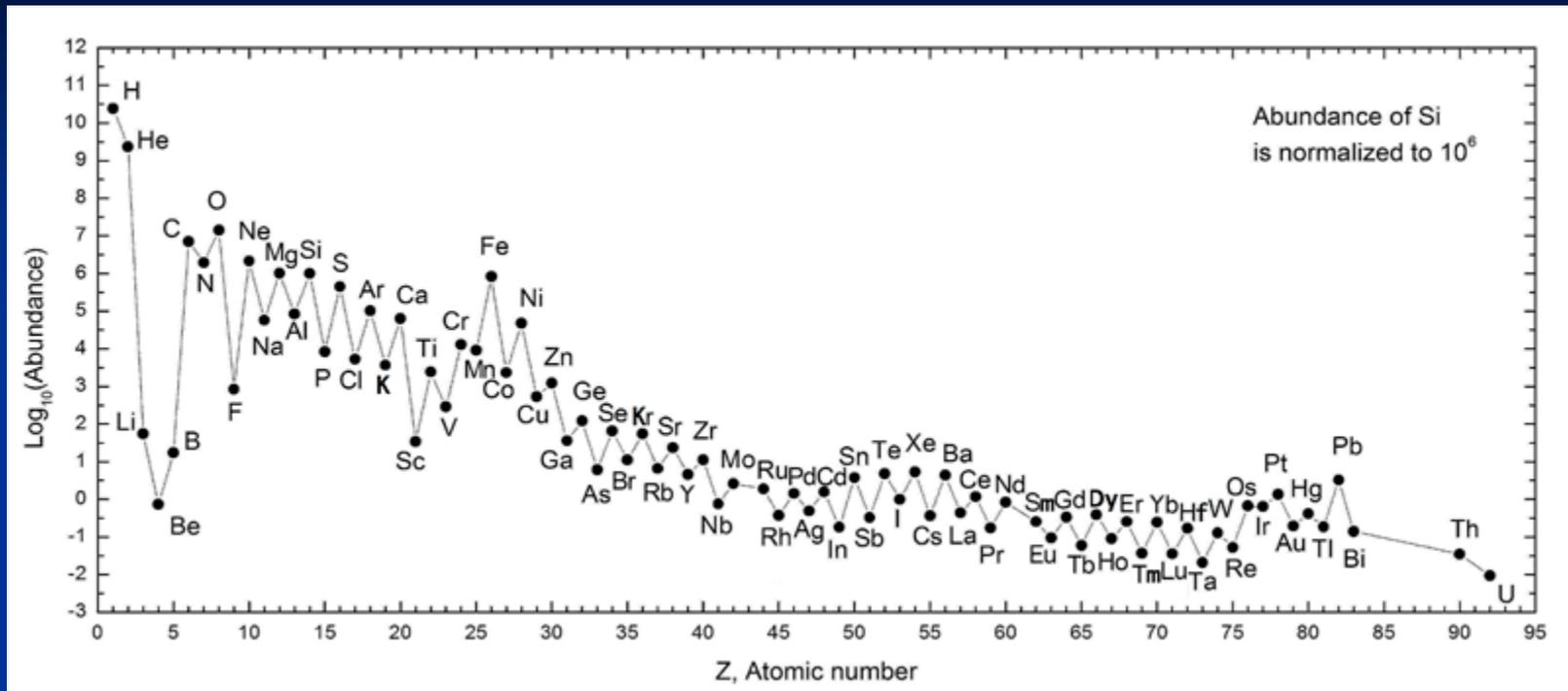
Le meteoriti, in particolare le **condriti carbonacee**, rare e primitive, possono essere considerate (se si escludono elementi atmofili come H, He, N, O, C e gli altri gas nobili), **rappresentative di materia primordiale non differenziata** ed hanno una composizione simile alle rocce terrestri ultramafiche (Ni e Fe) con tracce di H₂O e composti organici (amminoacidi).

Allende-MES: la più antica (4,56 Miliardi d'anni !!!)

Murchison-AUS: di origine cometaria (12% d'acqua) e 92 amminoacidi



L'abbondanza cosmica degli elementi chimici - 3

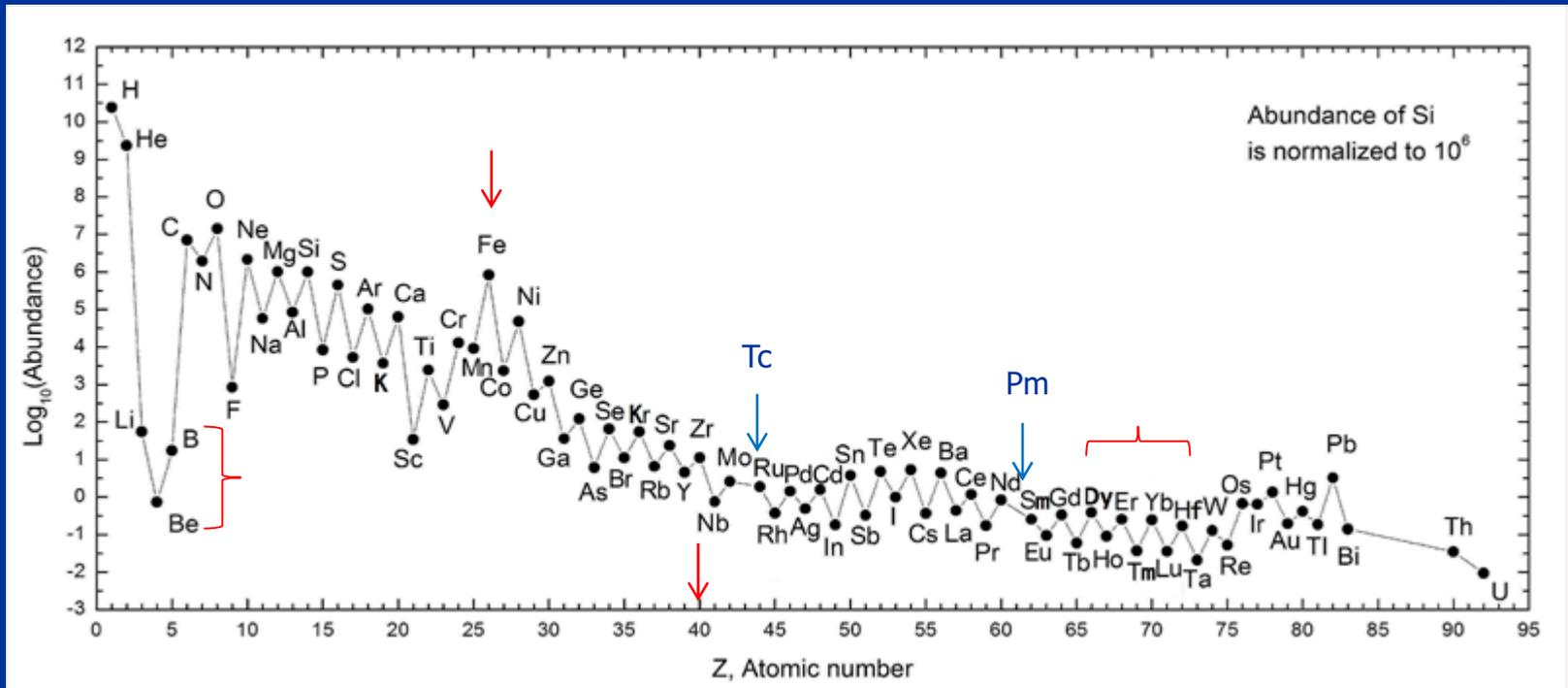


Esaminando il complesso dei dati si può osservare che:

- l'**H** è l'elemento più abbondante, seguito da **He, O, C, Ne, N, Si, Mg, Fe** ecc. atomico (la somma H+He costituisce il 95-98% degli elementi)
- l'**H, He, Ne, N, C** sono molto abbondanti nelle stelle e poco nella crosta terrestre
- l'**O, Si, Al, Mg, Fe** sono molto abbondanti sia nelle atmosfere stellari che nella crosta terrestre.

In generale si può affermare che :

- 1) L'abbondanza degli elementi diminuisce al crescere del numero atomico Z (*prima legge della geochimica*).
- 2) Gli elementi con numero atomico pari sono più abbondanti di quelli con numero atomico dispari che li precedono e seguono immediatamente (*legge di Oddo-Harkins*)



Ci sono delle anomalie evidenti per alcuni elementi come **Li**, **Be**, **B** e **Fe**.

I primi tre verificano la *legge di Oddo Harkins* nelle condriti, ma nelle stelle si trasformano secondo le reazioni:



mentre l'anomalia positiva del gruppo del **Ferro** è dovuta ai processi di formazione e/o "*processi all'equilibrio*" dove ad ogni processo di fusione corrisponde un processo di fotodisintegrazione.



alle temperature dell'ordine di $4 \cdot 10^9$ K, la fotodisintegrazione è in equilibrio con la fusione. In queste condizioni, i nuclei con energia di legame più elevata, come quelli del **Ferro**, sono più stabili.

PRIMA DIFFERENZIAZIONE GEOCHIMICA: Formazione del nucleo e del mantello

Le elevate temperature provocarono la quasi totale fusione dei materiali costituenti il nostro proto-pianeta.



Prima differenziazione geochimica:
la formazione e separazione di 2 distinte fasi, metallica e silicatica

- Gran parte del Fe e del Ni (allo stato fuso) si separarono in una fase metallica che, per la sua maggiore densità, confluì verso il centro del pianeta.
- Formazione del nucleo terrestre.
- Raffreddamento e solidificazione del restante materiale a costituire il mantello.
- Composizione silicatica ultrafemica (O, Si, Mg, Fe).

SECONDA DIFFERENZIAZIONE GEOCHIMICA: Formazione della crosta terrestre

- La crosta terrestre, l'idrosfera e l'atmosfera si sono formate dopo il nucleo ed il mantello, secondo processi più lenti e più complessi innescati dal rilascio di “materiali” dal mantello superiore nei primi stadi della vita della Terra.
- La crosta terrestre si è formata, e si forma tuttora, in seguito ad una complessa sequenza di processi magmatici in cui giocano un ruolo primario i fenomeni di fusione parziale e cristallizzazione frazionata.
- Questi processi magmatici coinvolgono sia il mantello sia la crosta terrestre (oceanica e continentale).
- L'insieme di questi eventi individua la seconda differenziazione geochimica.

Classificazione Geochimica degli elementi secondo Goldschmidt

Questa classificazione si deve a Goldschmidt che introdusse il concetto di **affinità geochimica** di un elemento. Piuttosto che riferirsi a pure condizioni di equilibrio termodinamico preferì considerare la ripartizione di ciascun elemento fra coppie di sistemi naturali (es. crosta e atmosfera) considerando un fattore di arricchimento (E.F. *Enrichment Factor*):

$$E.F. = (N/Fe)_{atm} / (N/Fe)_{lit}$$

dove N=Azoto e Fe=Ferro

In base all'ipotesi di una differenziazione geochimica del pianeta in un nucleo denso, formato da leghe di **Fe e Ni**, circondato da **Solfuri**, quindi uno strato di **Silicati** ed infine dall'**Atmosfera**, gli elementi sono stati distinti in:

SIDEROFILII CALCOFILII LITOFILII ATMOFILII

SIDEROFILI

Elementi che hanno spiccata affinità con la fase metallica (nucleo). Il comportamento siderofilo di un elemento è in relazione con la sua inerzia chimica, associata ad un alto potenziale di ionizzazione.

Appartengono a questo gruppo molti degli elementi di transizione (Fe, Co, Ni, Mo, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au) che si rinvengono concentrati nel nucleo

CALCOFILI

Elementi che hanno spiccata affinità per lo Zolfo e quindi, in assenza di Ossigeno, tendono a combinarsi con questo elemento formando legami covalenti.

Minerali tipici sono quelli appartenenti al gruppo dei Solfuri.

Molti elementi di transizione e parte degli elementi dei gruppi IV, V e VI (Cu, Zn, As, Ag, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb).

LITOFILI

Elementi che tendono a formare legami spiccatamente ionici con l'Ossigeno (I e II gruppo e alcuni elementi di transizione), presenti in mantello e crosta, in minerali quali silicati, ossidi, carbonati e cloruri.

ATMOFILI

Elementi volatili (N e gas nobili) legati alla formazione della proto-Terra che sono rimasti allo stato gassoso. Impoveriti rispetto all'abbondanza nel sistema solare.

Classificazione Geochimica degli elementi secondo Goldschmidt

Siderofili	Calcofili	Litofili	Atmofili
P, Ge, Sn, Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au, Re, Mo	Cu, Zn, Ga As, Se, Ag, Cd, In, Sb, Te, Hg, Tl, Pb, Bi	Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, T.R., Hf, Ta, W	H, C, N, O, He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, (Hg)

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac															
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
			90 Th	91 Pa	92 U												

L'abbondanza degli elementi chimici sulla terra

Per quanto riguarda lo studio della terra, solo una piccolissima porzione superficiale è disponibile per osservazioni e analisi dirette, mentre per la restante parte ci si deve basare sulle interpretazioni del comportamento di altri parametri fisici.

La parte che è accessibile all'indagine diretta è limitata alla parte composta dalla crosta più quella parte del mantello che presenta le caratteristiche tipiche di un solido detta litosfera, all'involucro gassoso che circonda la terra o atmosfera, al complesso delle acque continentali, oceaniche, ghiacciai e nevi perenni detta idrosfera, al complesso della sostanza vivente detta biosfera.

L'atmosfera, idrosfera, biosfera e litosfera (pedosfera) costituiscono le cosiddette "sfere geochimiche esterne".

L'atmosfera

Uniforme dal punto di vista composizionale nei primi 60 km!

Elementi principali: **N₂, O₂, Ar**

Gas minori: **CO₂, Ne, He, CH₄, Kr, N₂O, H₂, O₃, Xe**

L'anidride carbonica (**CO₂**) è particolarmente importante insieme all'ozono (**O₃**) che è abbondante specialmente nella troposfera ed assorbe le radiazioni ultraviolette.

La massa dell'atmosfera è in perenne movimento per effetto della circolazione delle masse d'aria (venti) che determina il trasporto del vapore acqueo oltreché di fini particelle solide (polveri).

L'idrosfera

La sua composizione media è praticamente quella degli oceani!

Ioni maggiori disciolti: Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+

L'idrosfera occupa una massa ragguardevole data essenzialmente dagli **oceani** ($1370 \times 10^6 \text{ km}^3$) che raccolgono **più del 97% dell'acqua del pianeta** e rappresenta un mezzo di trasporto potente di materiale sia in sospensione che in soluzione.

Il restante volume è l'acqua in forma solida dei ghiacciai, quelle appartenente alle acque sotterranee, a fiumi e laghi, al suolo e all'atmosfera. L'acqua contenuta negli organismi rappresenta la riserva più piccola.

Volume d'acqua conservato nelle riserve del ciclo idrologico		
Riserva	Volume (10^6 km^3)	Percentuale del totale
Oceani	1370	97,25
Ghiacciai	29	2,05
Acque sotterranee	9,5	0,68
Laghi	0,125	0,01
Umidità del suolo	0,065	0,005
Atmosfera	0,013	0,001
Corsi d'acqua	0,0017	0,0001
Biosfera	0,0006	0,00004

La biosfera

Pur rappresentando percentualmente una massa molto inferiore alle altre sfere geochimiche terrestri (idrosfera/atmosfera/biosfera = 70.000/300/1), qualitativamente la sua importanza è enorme!

La massa totale della biosfera è principalmente formata da:

H, C, N, O e P

La biosfera è, semplificando, formata da acqua (dal 50% per i vegetali al 99% per gli invertebrati marini), nella quale si trovano macromolecole organiche complesse.

Dal punto di vista geochimico, la biosfera è importante per il bilancio $\text{CO}_2\text{-O}_2$ attraverso processi come la **fotosintesi** e la **respirazione**, per la **formazione di sedimenti biogenici** (es. coralligeni) e di **precipitazione chimica** (es. fosforiti, evaporiti) e la **formazione di sedimenti organici** da cui hanno origini i combustibili fossili (petrolio, gas, carbone).

La litosfera

Crosta, mantello e nucleo sono i 3 grandi “gusci concentrici” della struttura interna del pianeta.

La **LITOSFERA**, comprende la crosta e la parte superiore del mantello (litosferico). Di questa piccola porzione superficiale, si possono avere notizie dirette sulla composizione mineralogica dalle osservazioni e dalle analisi dei materiali provenienti dall'**Astenosfera** che è la parte a comportamento plastico del mantello (100-300 km).

I **dati diretti** riguardano comunque una porzione che arriva ad una profondità massima di circa 300 km, mentre la parte sottostante viene dedotta dal comportamento delle onde sismiche e da valutazioni che giustifichino la massa e altri parametri fisici (**dati indiretti**).

Il XX° secolo ha visto un susseguirsi di teorie che hanno cercato di spiegare la **formazione delle rocce cristalline** e l'evoluzione della parte superficiale terrestre passando attraverso la **teoria della deriva dei continenti** di Alfred Wegner fino alla **teoria della tettonica a placche**, suggerita nel 1928 dal britannico Arthur Holmes.

Origine della terra

Dal punto di vista dell'età della terra, le **datazioni** ottenute **con metodi radiometrici** su campioni di meteoriti, **ci indicano** un'età che si aggira sui 4,5 – 5 miliardi di anni.

Questo valore è verosimilmente l'età della terra e anche del sistema solare.

Nel confronto con altri pianeti, a prescindere da altre caratteristiche, balza evidente la **densità (ρ)** rispetto all'acqua, alta per i cosiddetti pianeti interni, bassa per quelli esterni :

Mercurio	5,42 g/cm ³	Giove	1,31
Venere	5,25	Saturno	0,69
Terra	5,52	Urano	1,29
Marte	3,94	Nettuno	1,64
		Plutone	2,03

In particolare, la Terra ha la densità massima rispetto agli altri pianeti del sistema solare e quindi un'accelerazione di gravità che consente di impedire la perdita di elementi gassosi

La terra: densità

Tenendo conto dell'accelerazione di gravità sulla superficie terrestre e dell'attrazione gravitazionale, la **densità media** della terra è di circa **5,5 g cm⁻³**.

Questo valore è molto maggiore di quello medio delle rocce che affiorano in superficie (2,2-2,9 g cm⁻³), quindi l'interno della terra deve avere densità sicuramente maggiore di 5,5 g cm⁻³, arrivando a 9-13 g cm⁻³ nel nucleo.

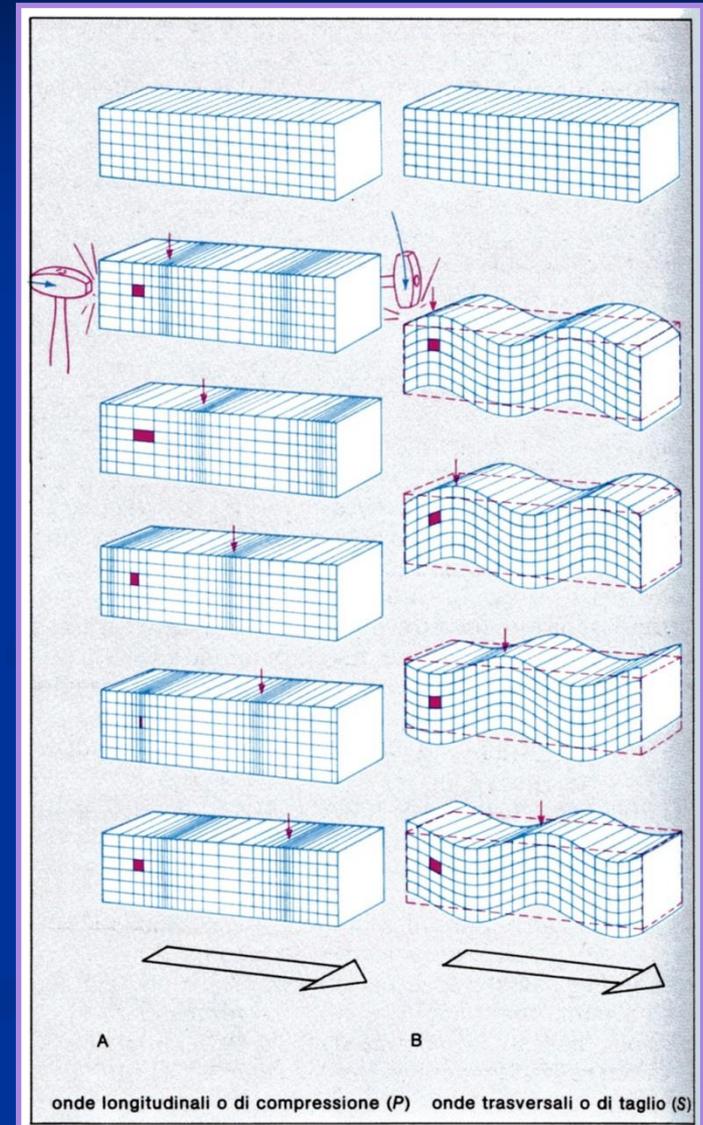
Inoltre, dal calcolo del momento d'inerzia della terra come fosse una sfera omogenea con densità media indicata, questo risulta minore.

L'aumento di densità verso il centro del pianeta è, molto probabilmente, dovuto a due fattori:

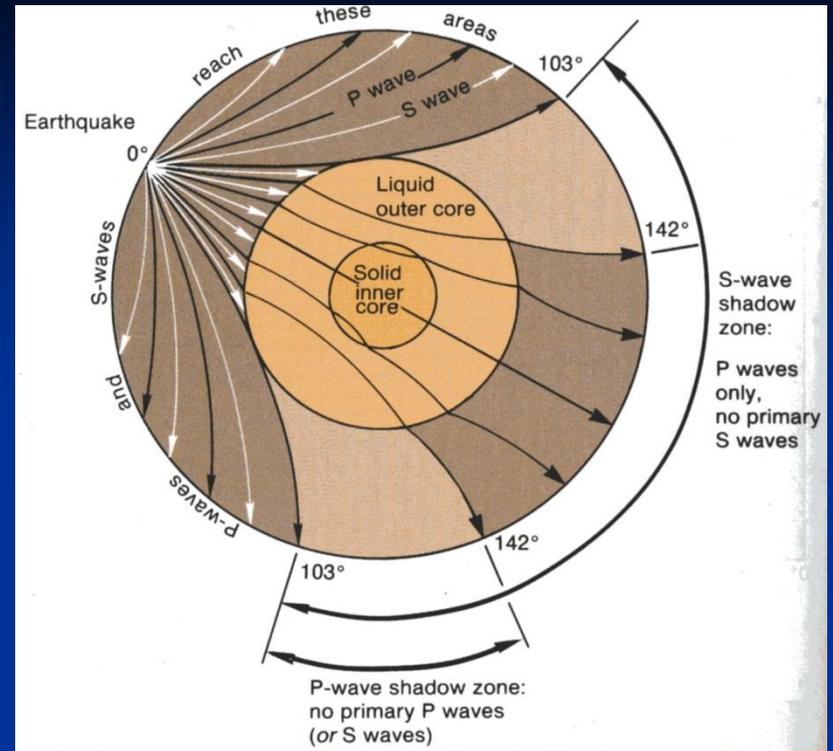
- a) aumento della compressione
- b) concentrazione di elementi più densi ad una distanza minore dall'asse di rotazione.

Le onde sismiche

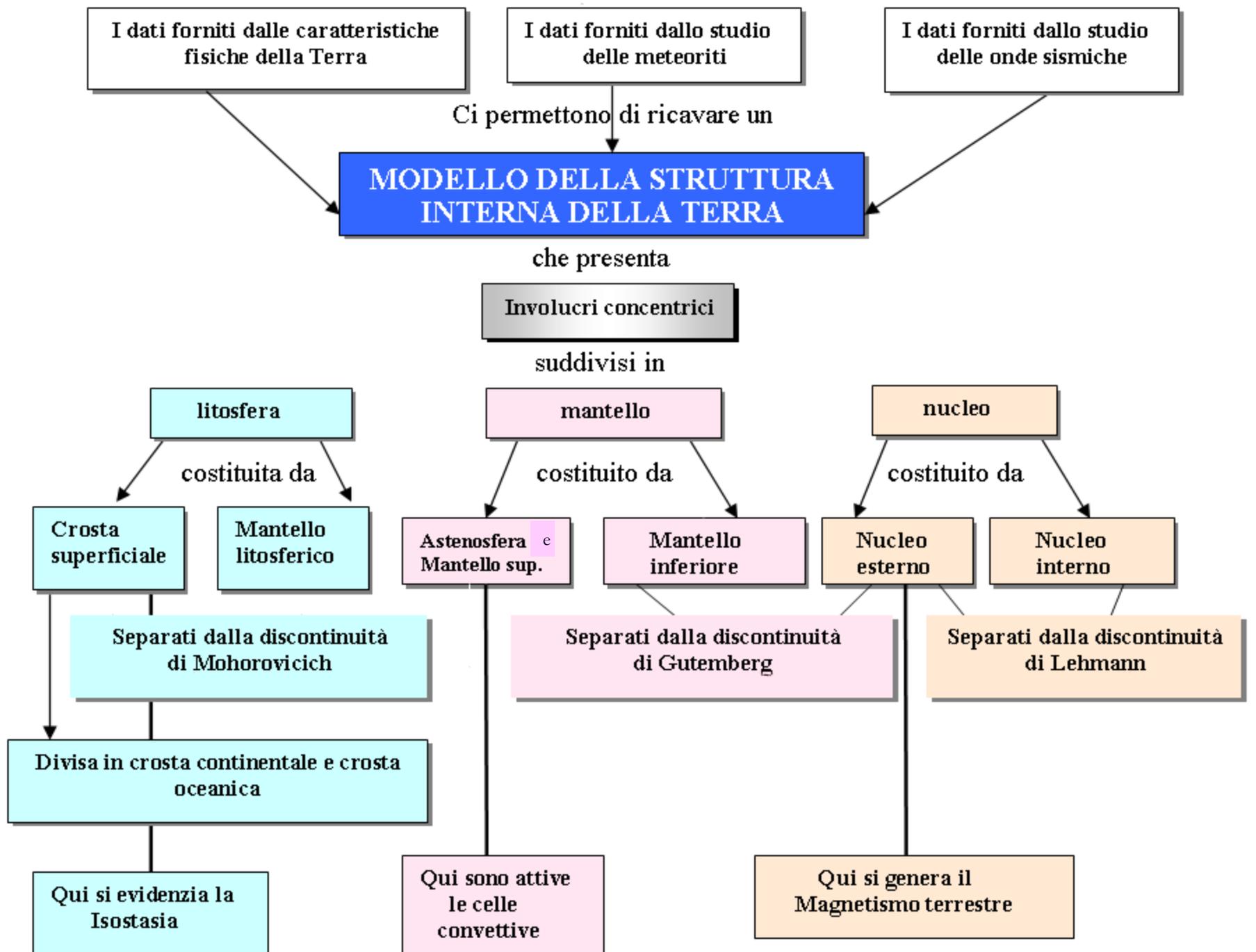
- Onde interne (di volume)
 1. *compressive o primarie (P):*
5.95-6.75 km/s
 2. *di taglio o secondarie (S):*
2.9-4.0 km/s maggior ampiezza e
distruttività



Propagazione delle onde sismiche



- Le onde di taglio (S) non “viaggiano” attraverso il nucleo esterno liquido
- La rifrazione interessa le onde di compressione (P)
- Esiste una “zona d’ombra” per le onde S diametralmente opposta al fuoco del sisma



I dati forniti dalle caratteristiche fisiche della Terra

I dati forniti dallo studio delle meteoriti

I dati forniti dallo studio delle onde sismiche

Ci permettono di ricavare un

MODELLO DELLA STRUTTURA INTERNA DELLA TERRA

che presenta

Involucri concentrici

suddivisi in

litosfera

mantello

nucleo

costituita da

costituito da

costituito da

Crosta superficiale

Mantello litosferico

Astenosfera e Mantello sup.

Mantello inferiore

Nucleo esterno

Nucleo interno

Separati dalla discontinuità di Mohorovicich

Separati dalla discontinuità di Gutenberg

Separati dalla discontinuità di Lehmann

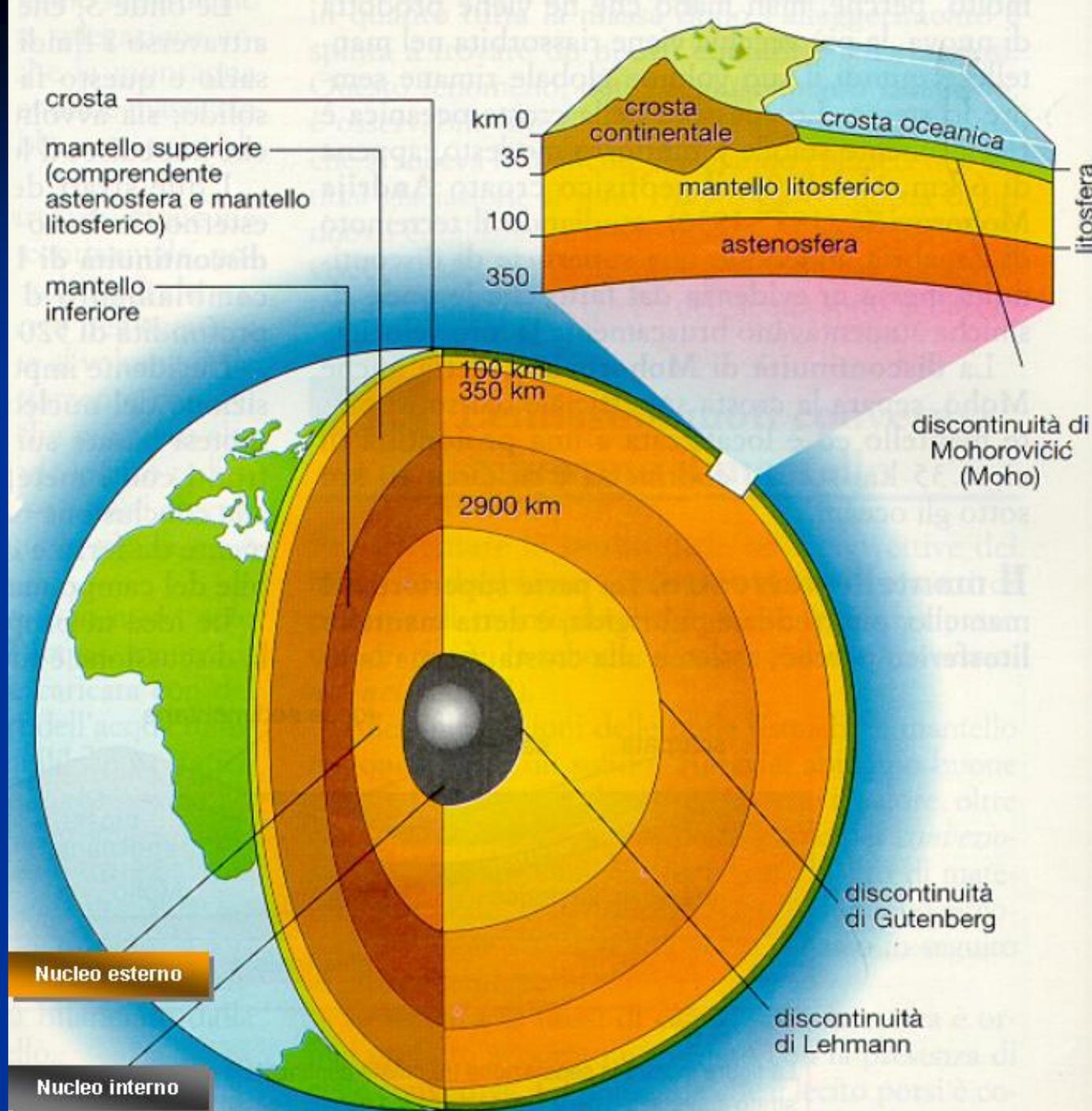
Divisa in crosta continentale e crosta oceanica

Qui si evidenzia la Isostasia

Qui sono attive le celle convettive

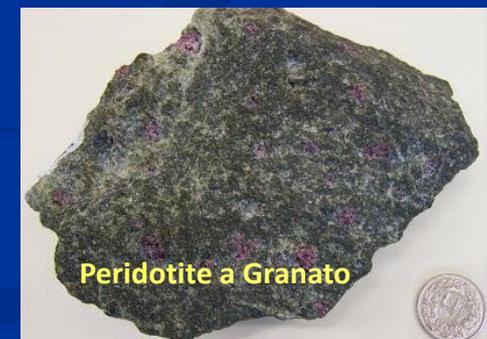
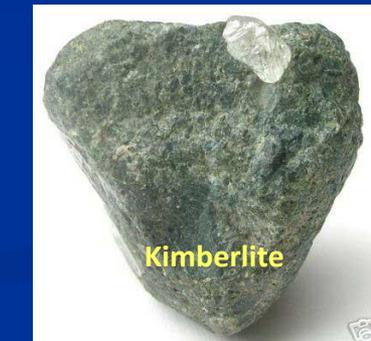
Qui si genera il Magnetismo terrestre

La struttura della terra



km DI PROFONDITÀ		
10+40	CROSTA	<i>Crosta superiore</i> mediamente a composizione granitica DENSITA' $2,5 \div 2,7 \text{ gcm}^{-3}$ <i>Crosta inferiore</i> : la cosiddetta discontinuità di Conrad che dovrebbe separare la crosta superiore da quella inferiore probabilmente non esiste in termini di differenze composizionali. DENSITA' $\sim 2,8 \text{ gcm}^{-3}$ Velocità delle onde P (Vp) nella crosta = $7,7 \text{ kms}^{-1}$
400	rocce ultrafemiche densità $\sim 3,3 \text{ gcm}^{-3}$	DISCONTINUITA' DI MOHOROVICIC (MOHO)
700	MANTELLLO densità $\sim 3,7 \div 4,5 \text{ gcm}^{-3}$ Vp = $8,1 \text{ kms}^{-1}$ materiali ricchi in silicati di Fe e Mg densità variabile da $\sim 3,9$ a $\sim 5,1 \text{ gcm}^{-3}$	
2885	Vp = $13,7 \text{ kms}^{-1}$	<i>Litosfera</i> : comprende Crosta e Mantello litosferico <i>Mantello litosferico</i> : comprende il settore sottostante la crosta con peridotiti a spinello e kimberliti. <i>Astenosfera</i> : da circa 100 a circa 300 km con peridotiti a granato e comportamento plastico. <i>Mesosfera</i> o zona di transizione al mantello inferiore da circa 600 a circa 1000km. <i>Mantello inferiore</i> a comportamento rigido da circa 1000 a circa 2885 km Vp = $13,7 \text{ kms}^{-1}$
	Vp = $8,1 \text{ kms}^{-1}$	DISCONTINUITA' DI GUTENBERG Discontinuità di Gutenberg: assorbimento delle onde sismiche trasversali e brusca variazione di velocità di quelle longitudinali.
5200	NUCLEO ESTERNO densità variabile da ~ 11 a $\sim 14 \text{ gcm}^{-3}$ Vp = $10,4 \text{ kms}^{-1}$	<i>Nucleo esterno</i> a comportamento fluido: probabili elevati contenuti in Fe e Ni. E' la più probabile sorgente del campo magnetico terrestre generato da moti convettivi dal mantello fluido.
	Vp = $11,0 \text{ kms}^{-1}$	DISCONTINUITA' DI LEHMANN
	NUCLEO INTERNO densità fino a $\sim 16 \text{ gcm}^{-3}$ Vp = $11,3 \text{ kms}^{-1}$	<i>Nucleo interno</i> a comportamento rigido probabilmente costituito da ferro ed altri elementi non ben identificati.

La struttura della terra



Composizione chimica della terra

Per quanto riguarda la composizione chimica della terra, non essendo possibile il controllo diretto ci si deve basare su teorie che giustificano alcuni parametri fisici altrimenti di difficile interpretazione.

Per il **nucleo** e la **terra** nel suo insieme si suppone ci siano le seguenti abbondanze in % in peso:

Nucleo
Fe = 79,39
Ni = 4,87
Si = 7,35
S = 2,30
O = 4,10

Terra nel suo insieme	
O = 32,44	Na = 0,25
Si = 17,22	K = 0,02
Al = 1,51	S = 0,70
Mg = 15,87	Ti = 0,07
Fe = 28,18	Ni = 1,61
Ca = 1,61	

Per il **mantello originario**, quello cioè primigenio che non ha subito fusioni parziali e quindi differenziazioni magmatiche, si è fatto riferimento a **Lherzoliti*** provenienti dal mantello superiore e vengono proposte le seguenti percentuali in peso

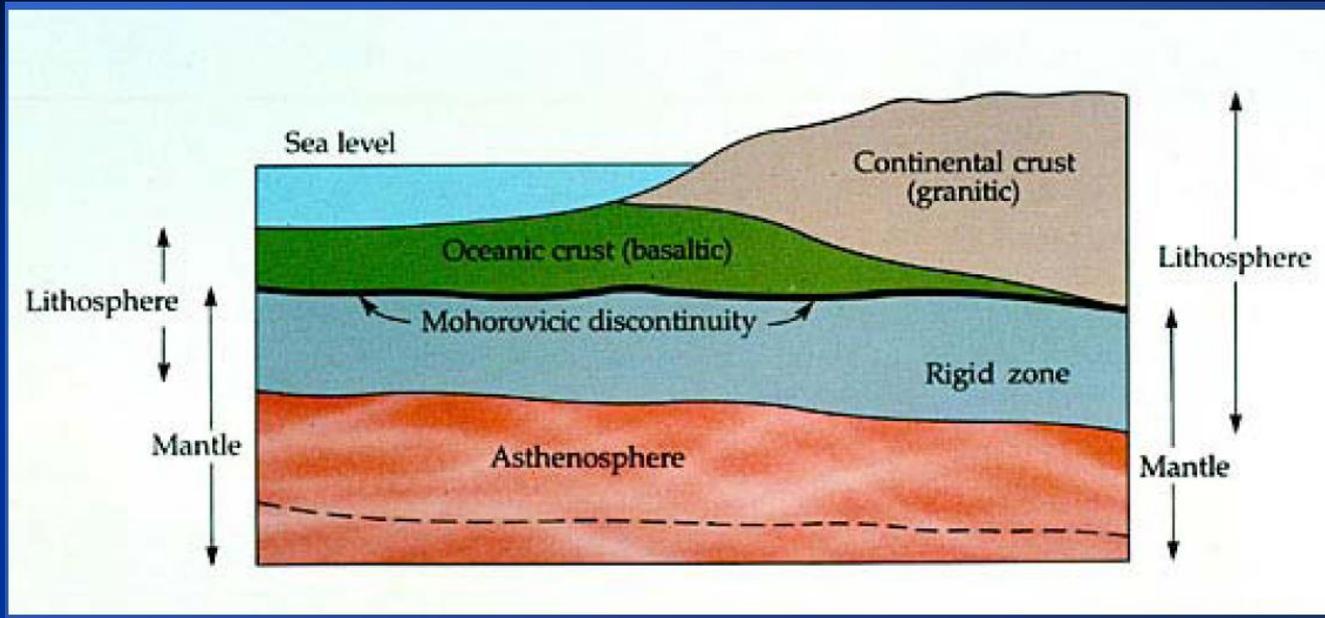
O = 44,79	Fe = 5,82	Mn = 0,116
Si = 21,52	Ca = 2,31	Ti = 0,112
Al = 2,16	K = 0,03	Ni = 0,200
Mg = 22,78	Na = 0,26	Cr = 0,270



Questi dati non si devono considerare assolutamente definitivi, in quanto sono frutto di osservazioni e analisi in continua evoluzione anche in virtù dell'evoluzione tecnologica che permette di ottenere informazioni impensabili fino a cinquant'anni fa.

*rocce ultrabasiche composte da olivina, clinopirosseno e ortopirosseno (fasi accessorie: plagioclasio, spinello, granato, ilmenite, cromite e magnetite)

La crosta terrestre: crosta oceanica e crosta continentale



La Crosta terrestre costituisce circa l'1% della massa della Terra. Nella terra solida si distingue una parte superiore della Crosta, fortemente irregolare e sottile, che dalla superficie giunge sino alla **discontinuità di Mohorovicic** che nelle aree continentali si rinviene mediamente tra i 30 e 40 km, negli oceani a circa 7 km di profondità.

Tra la **Crosta Continentale**, fortemente eterogenea, e quella **Oceanica** più regolare, esiste un netto contrasto strutturale e compositivo.

Composizione chimica della Crosta

Le conoscenze circa la composizione chimica della crosta e, quindi, della distribuzione degli elementi, derivano da numerose analisi di vari tipi di rocce eruttive, sedimentarie e metamorfiche.

La prima stima della composizione media delle rocce eruttive si deve a Clarke e Washington alla quale seguirono numerose altre.

1 media aritmetica di 5159 rocce eruttive

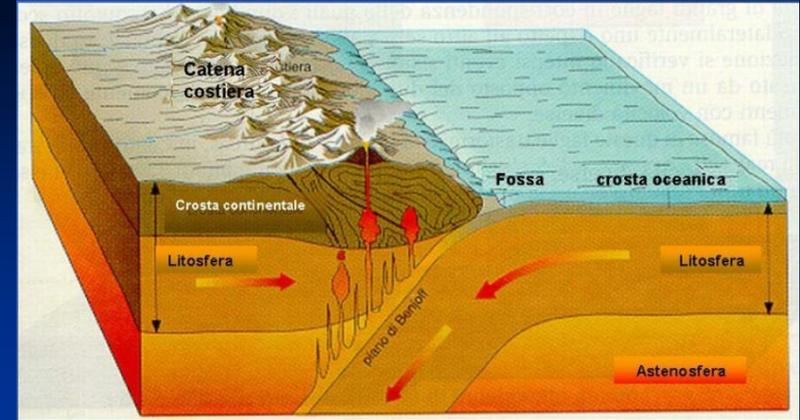
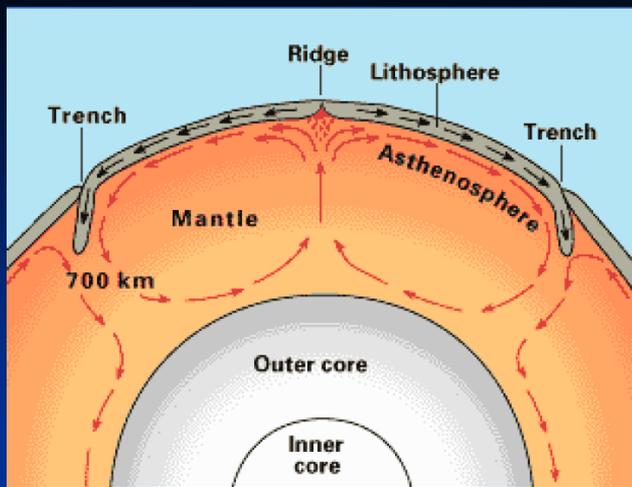
2 media pesata di rocce crostali sia continentali che oceaniche

3 media pesata di rocce crostali continentali

4 media pesata di rocce eruttive della crosta superiore

5 media pesata di rocce crostali sia continentali che oceaniche

	Clarke & Washington (1924)	Poldervaart (1955)	Taylor (1964)	Wedepohl (1969)	Ronov & Yaroshevsky (1969)
	1	2	3	4	5
SiO ₂	59.1	55.2	60.4	66.4	59.3
TiO ₂	1.0	1.6	1.0	0.7	0.9
Al ₂ O ₃	15.3	15.3	15.7	14.9	15.9
Fe ₂ O ₃	3.1	2.8	7.2	1.5	2.5
FeO	3.8	5.8		3.0	4.5
MgO	3.5	5.2	3.9	2.2	4.0
CaO	5.1	8.8	5.8	3.8	7.2
Na ₂ O	3.8	2.9	3.2	3.6	3.0
K ₂ O	3.1	1.9	2.5	3.3	2.4
H ₂ O	1.1	-	-	0.6	-



Crosta oceanica

Contenuto medio dei principali elementi chimici nella crosta oceanica (analisi di 1266 campioni di Mid-Ocean Ridge Basalts - MORB).

Basalto



Il chimismo della crosta oceanica può essere ricondotto a quello medio dei basalti che si formano lungo le dorsali medio oceaniche

contenuto medio (%)	
SiO ₂	50.39
TiO ₂	1.72
Al ₂ O ₃	14.93
FeO(tot)	10.20
MnO	0.18
MgO	7.34
CaO	11.29
Na ₂ O	2.86
K ₂ O	0.25
P ₂ O ₅	0.35
99.52	

Crosta continentale

Chimismo medio della crosta continentale di tipo andesitico.

SiO ₂	59-63
TiO ₂	0.6-0.7
Al ₂ O ₃	15-16
FeO	4.9-6.6
MnO	0.1
MgO	2.8-4.4
CaO	4.7-6.4
Na ₂ O	3.2-4.2
K ₂ O	1.9-2.4
P ₂ O ₅	0.1-0.2

- Dall'esame comparativo dei dati ottenuti progressivamente nel tempo risulta che il margine di incertezza relativo alla **composizione della crosta** è ormai molto ristretto.

O = 46 %	Mg = 4 %
Si = 28 %	Ca = 2,4 %
Al = 8 %	K = 2,3 %
Fe = 6 %	Na = 2,1 %

- **L'elemento più abbondante è l'ossigeno.** Si può considerare la crosta come costituita fundamentalmente da un impacchettamento di atomi di ossigeno tenuti assieme da interazioni elettrostatiche con cationi.
- Seguono, in ordine di abbondanza decrescente Si, Al, Fe, Mg, Ca, K e Na, che, con l'ossigeno, costituiscono il 98.5% in peso della crosta. Questi **elementi** sono detti "**maggiori**", perchè sono presenti nella crosta con una **percentuale in peso > dell' 1 %**.
- Il restante 1,5 % è rappresentato dagli **elementi "minori" (percentuale in peso compresa tra 1 e 0,1 %)** (il solo Titanio è presente con lo 0.5 %) e dagli **elementi "in tracce" (concentrazione inferiore a 0,1 %, cioè in ppm)**, la cui importanza geochimica non è sicuramente minore se si considera che fra questi si trovano elementi quali Cu, Ag, Pb, C, Zn, Hg ecc.

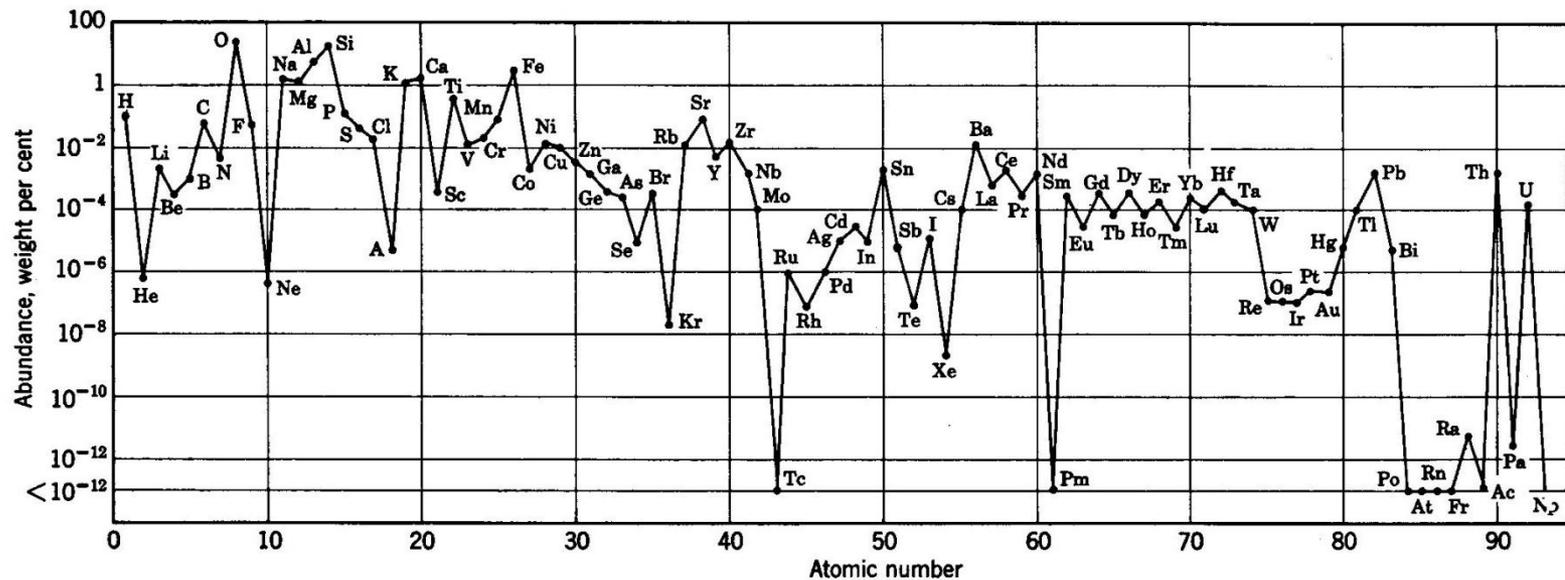
Composizione della Crosta

Elemento	ppm (g/ton)						
O	455000	Cl	126	Th	8.01	Tl	0.7000
Si	272000	Cr	122	Sm	7.00	Tm	0.5000
Al	83000	Ni	99	Gd	6.01	I	0.4600
Fe	62000	Rb	78	Er	3.05	In	0.2400
Ca	46600	Zn	76	Yb	3.01	Sb	0.2000
Mg	27640	Cu	68	Hf	2.08	Cd	0.1600
Na	22700	Ce	66	Cs	2.06	Ag	0.0800
K	18400	Nd	40	Br	2.05	Hg	0.0800
Ti	6320	La	35	U	2.03	Se	0.0500
H	1520	Y	31	Sn	2.01	Pd	0.0150
P	1120	Co	29	Eu	2.01	Pt	0.0100
Mn	1060	Sc	25	Be	2.00	Bi	0.0080
F	544	Nb	20	As	1.08	Os	0.0050
Ba	390	N	19	Ta	1.07	Au	0.0040
Sr	384	Ga	18	Ge	1.05	Ir	0.0010
S	340	Li	18	Ho	1.03	Te	0.0010
C	180	Pb	13	Mo	1.02	Re	0.0007
Zr	162	Pr	9.01	W	1.02	Ru	0.0001
V	136	B	9.00	Tb	1.02	Rh	0.0001

Osservando i dati della tabella si può evidenziare come alcune idee correnti sull'**abbondanza** o rarità di certi **elementi** debbano essere rivedute.

- Il **Cu**, ritenuto un elemento comune è meno abbondante dello **Zr**, il **Rb** e le cosiddette "**terre rare**" sono più abbondanti dello **Sn**, **Pb**, **Hg**.

- Il comportamento anomalo del **S** rispetto al **P** e di altri elementi dimostrano che la crosta è risultato di un intenso processo di differenziazione.



Crustal abundances of elements of atomic numbers 1 to 93.

- Alcuni elementi, pur essendo **relativamente abbondanti**, sono **poco “disponibili”** altri, **meno abbondanti**, sono **più disponibili**.
- Un elemento risulta **disponibile**, anche se poco abbondante, se è **capace di formare minerali propri** e se tali minerali si trovano convenientemente concentrati (es. Cu, Pb, Sb, Zn).
- Viceversa, un elemento anche abbondante può non essere capace di formare minerali propri, poiché si trova totalmente **incorporato nelle strutture cristalline di minerali comuni**, che fungono da ospiti: si parla in questo caso di **elementi dispersi** (es. Ga, Rb, alcune terre rare).
- Vi sono poi degli elementi i quali danno luogo a formazioni di minerali propri, ma tali minerali raramente si trovano concentrati: essi, abitualmente, sono disseminati come costituenti accessori nelle rocce comuni. Si parla in questo caso di **minerali dispersi** e di **elementi in minerali dispersi** (es. zirconio-Zr-Hf).
- Alcuni elementi sono oggi più disponibili di quanto non lo fossero in passato in seguito allo sviluppo di nuove tecniche estrattive o di lavorazione. Così, ad esempio, la disponibilità di Afnio è attualmente considerevole per la lavorazione di notevoli quantitativi di zirconio.

I minerali* della crosta terrestre

Silicati

Feldspati (feldspato potassico + plagioclasti)	60%
Quarzo	12%
Silicati femici (olivine, pirosseni, anfiboli, biotite)	17%
	tot. 89%

Le rimanenti fasi mineralogiche (ca. 11%) della crosta terrestre sono rappresentate da:

1. **altri silicati (es. minerali argillosi)**
2. **ossidi ed idrossidi (es. magnetite, ematite)**
3. **carbonati (es. calcite, dolomite)**
4. **solfori (es. pirite)**
5. **solforati (es. gesso)**
6. **fosforati (es. apatite)**
7. **alogenuri (es. cloruri e fluoruri)**
8. **elementi nativi (es. oro, argento)**

*Un minerale è un elemento o un composto chimico naturale che, generalmente è inorganico, solido, con una composizione chimica ben definita ed omogenea, con una struttura cristallina propria e che si forma spontaneamente in natura come risultato di un processo geologico

Sfruttamento delle risorse utili all'uomo

La crosta terrestre, sebbene rappresenti solo una piccola frazione della massa terrestre (circa 0,5%), è la parte più importante per quanto riguarda le interazioni con l'uomo.

La parte più superficiale è l'unica che si presta ad uno sfruttamento delle risorse presenti in essa.

Ai fini della utilizzazione di un materiale naturale per l'estrazione di un elemento, quest'ultimo deve essere presente in una percentuale sufficiente per giustificarne, dal punto di vista economico, la lavorazione.

L'abbondanza di ciascun elemento nella crosta può essere considerata come una costante caratteristica per l'elemento in questione, il cui valore può essere assunto come termine di riferimento per giudicare l'arricchimento o l'impovertimento di ciascun elemento nei diversi tipi di materiali.

Si definisce come “**clarke**” di un elemento **la percentuale media dell’elemento nella crosta.**

Clarke di concentrazione = concentrazione dell’elemento in un materiale / Clarke dell’elemento stesso.

Il **clarke di concentrazione** consente di stimare quale deve essere il rapporto di concentrazione di un elemento in un dato deposito, rispetto al valor medio crostale, affinché questo si possa considerare economicamente interessante.

Elementi	Clarke elemento	Percentuale minima Utile nel materiale	Clarke di concentrazione
Al	8.30	3	4
Fe	5.60	30	5
Mn	0.095	35	368
Cr	0.01	30	3000
Cu	0.0055	1	182
Ni	0.0075	1.5	200
Zn	0.0070	4	571
Sn	0.0002	1	5000
Pb	0.0013	4	3077
U	0.0003	0.1	333

Per poter ricavare degli elementi utili per l'uomo, in modo economicamente conveniente, è necessario individuare i siti dove risultino positive le anomalie di concentrazione rispetto alle percentuali medie della crosta terrestre.

Occorre identificare le zone favorevoli allo sfruttamento delle risorse, quindi è importante conoscere la distribuzione particolareggiata degli elementi su quella porzione di crosta accessibile dall'uomo.

Le carte geochimiche sono strumenti importanti per poter fare considerazioni sulle possibilità di approvvigionamento di elementi utili anche se, molto spesso, si limitano alla rappresentazione di uno spessore molto limitato in rapporto alle dimensioni della crosta.

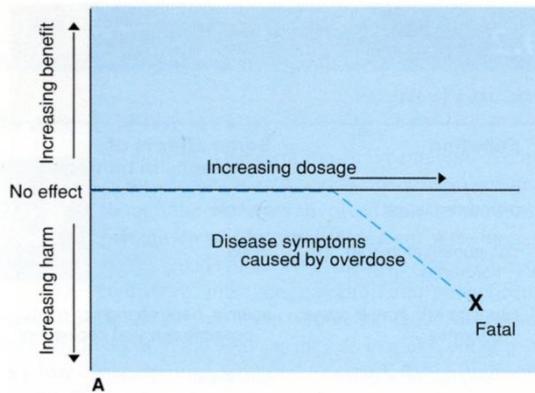
Oggi la geochimica, non è più finalizzata unicamente allo sfruttamento delle risorse minerarie, ma sta diventando uno strumento utile alla localizzazione di quegli elementi in traccia significativi per la vita.

La crosta e l'acqua marina sono le uniche fonti di approvvigionamento sulla terra degli elementi utilizzati nello sviluppo della vita.

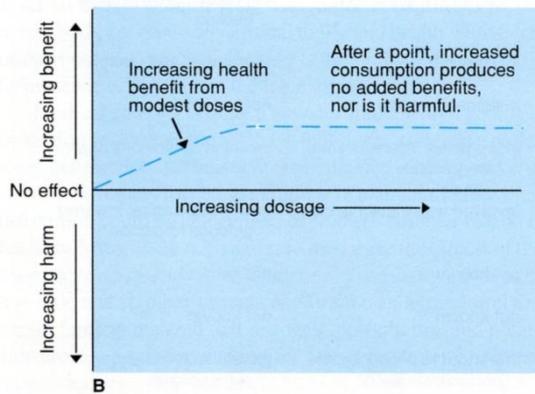
Gli elementi in traccia sono più importanti delle vitamine in quanto non possono essere sintetizzati, ma devono essere presenti nell'ambiente entro un intervallo di concentrazioni relativamente ristretto, al di fuori del quale si possono verificare danni dovuti sia alla carenza che alla tossicità per eccesso.

Non tutti gli elementi hanno uguali funzioni vitali....

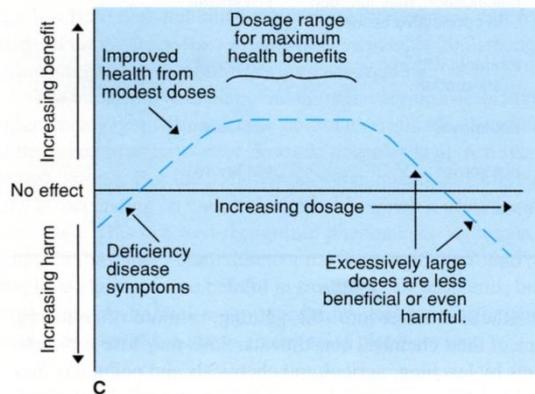
Effetti benefici o tossici in risposta alle dosi assunte



← Nessun effetto a basse concentrazioni, letale a dosi elevate (es. Pb, Hg)



← Benefici iniziali ed inferiori a determinate concentrazioni; nessun effetto a dosi elevate (es. Ca)



← Non può mancare; benefici inferiori a determinate concentrazioni; da tossico a letale in dosi elevate (es. Cu, Mo, F)

FLUORO (curva tipo C)

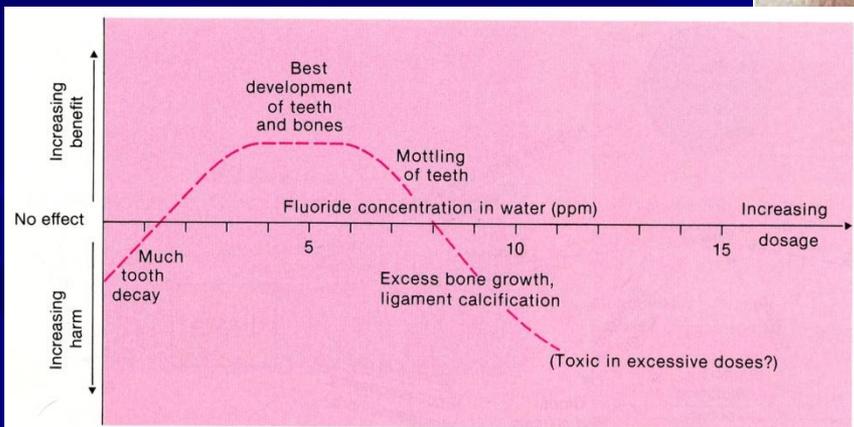
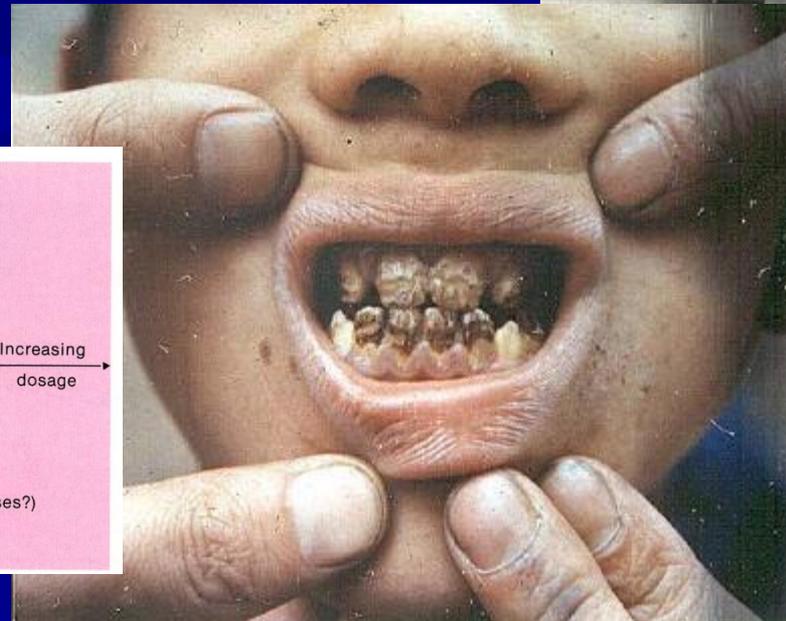
- nella crosta terrestre in alcune centinaia di ppm, nelle acque naturali in pochi ppm
- necessario per ridurre l'incidenza della carie (concentrazione ideale 1 ppm → 1 mg/l)
- 0.3-5 mg/giorno = dosi assumibili variabili in base alla dieta → suoli
- importante nella riduzione dell'osteoporosi

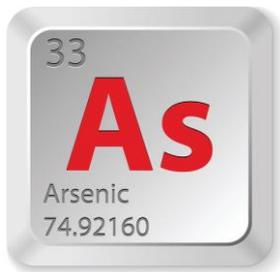
dosi anomali: 2-8 x dosi normali

causa: acque ricche in ioni F⁻ (in rocce ignee)

effetti: alterazione del colore nella dentatura

fluorosi dentaria (20-40 x)
e scheletrica





Metalloide
Calcofilo

Sorgenti naturali: scisti carboniferi, zolfo, sedimenti, sorgenti vulcaniche e termali.

Minerali:

Arsenopirite (FeAsS), Pirite arseniosa ($\text{Fe}(\text{AsS})_2$),
Realgar (As_4S_4), Orpimento (As_2S_3)



Realgar e Orpimento

Sorgenti antropogeniche:

Attività mineraria

Carbone

Pesticidi

Industria del vetro

Microelettronica

(GaAs, semiconduttore, laser,)

Medicina ($\text{As}_2\text{O}_3 \rightarrow$ leucemia)

$\text{As}_2\text{S}_2 \rightarrow$ pigmenti

Gas tossici militari (lewisite, $\text{C}_2\text{H}_2\text{AsCl}_3$)

Tossicità: Arsina (AsH_3) > As^{3+} inorg > As^{3+} org > As^{5+} inorg > As^{5+} org > As^0

Acute and chronic As exposure via drinking water has been reported all over the world

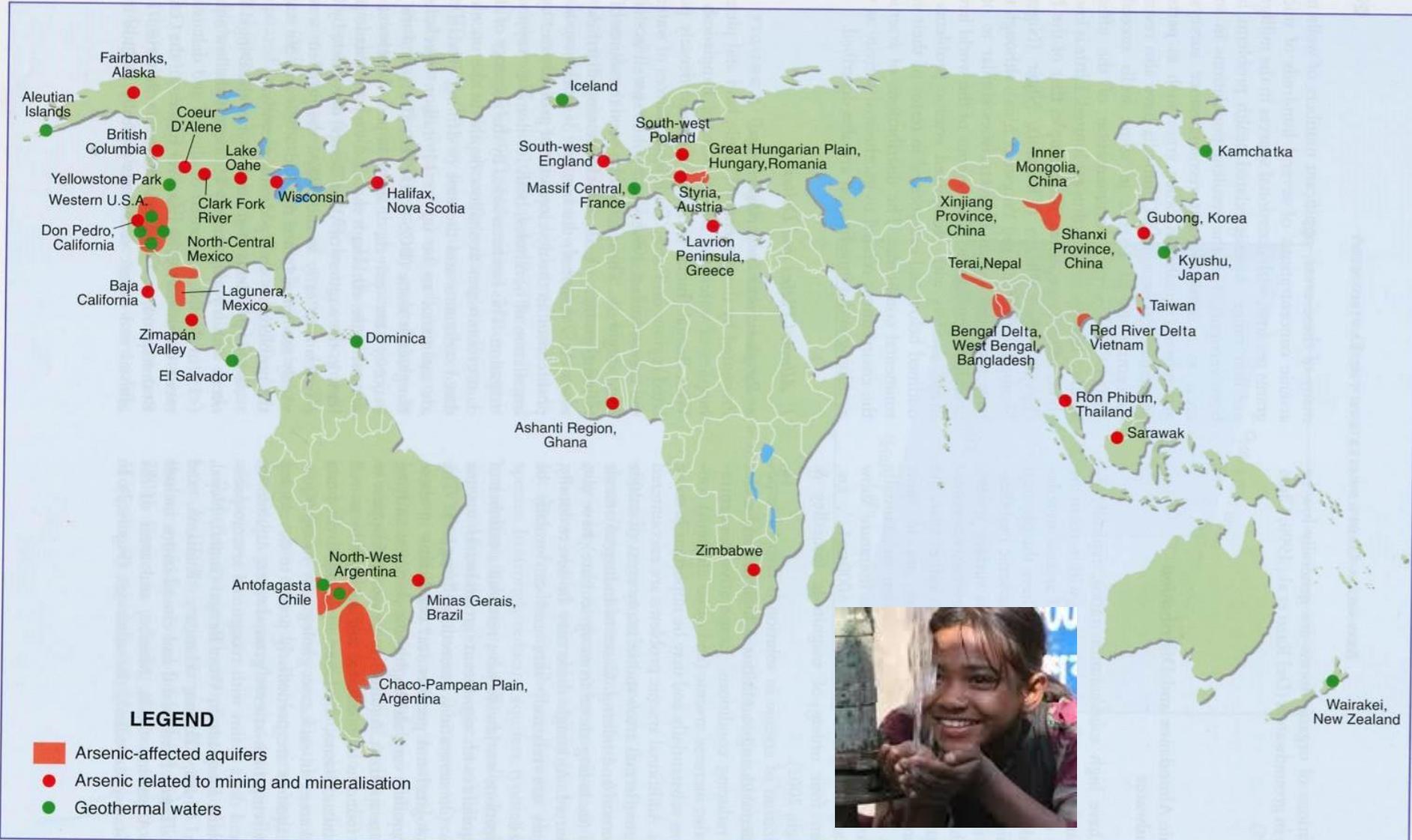


FIGURE 2 Occurrence of documented arsenic problems in groundwater (arsenic >50 µg L⁻¹) in major aquifers and (Smedley and Kinniburgh, 2002). Related to mining and geothermal sources.

Drinking water (WHO): 50 µg/l (1942); 10 µg/l (2002)

Smedley & Kinniburgh, 2005 - BGS

Arsenic in groundwaters of Bangladesh

Need of drinking waters → surface freshwaters polluted from bacteriological point of view → groundwaters as alternative hydrological resource

- 1993: first evidence of poisoning
- As in groundwaters: <math><0.50-3200\ \mu\text{g}/\text{l}</math>
- 2 millions of wells for drinking water supply
- 130 millions of inhabitants → 30 (80?) millions at risk
- 200.000 cronical affected: hyperpigmentation, arsenicosis and cancer of lung, skin, liver, urinary bladder, kidney and colon
- social problems



Anthropogenic factors or “natural” processes?

What is the mechanism for As release in groundwaters?



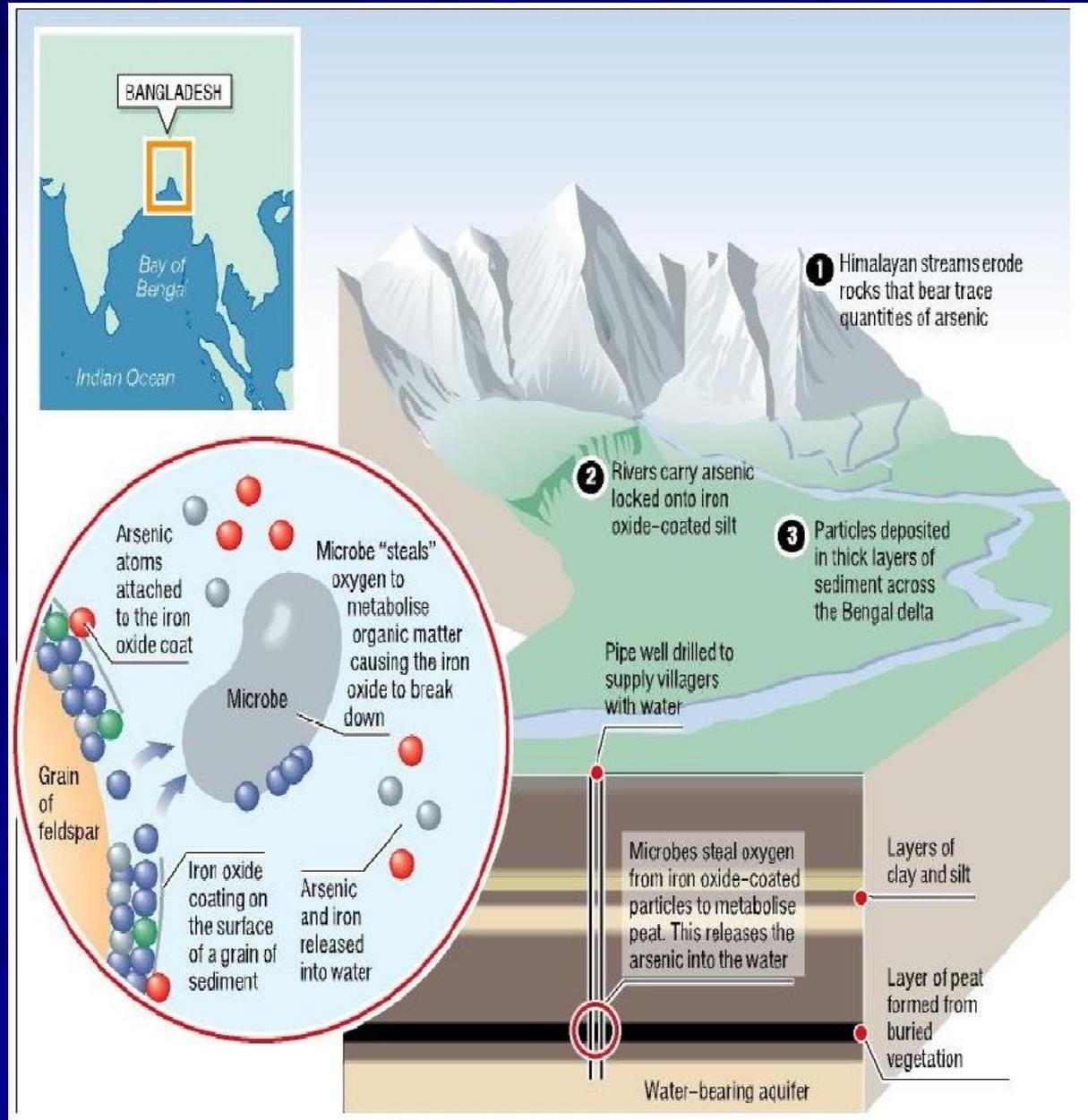
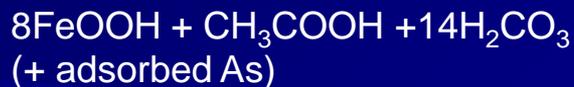
- 1) Oxidation of arsenopyrite (FeAsS) in groundwaters and release of As
$$4FeAsS + 13O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Fe^{2+} + AsO_4^{3-} + 4SO_4^{2-} + 12H^+$$
- 2) “Competitiveness” among anions: adsorbed As is released in solution in favour of phosphates (organic matter, fertilizers ?)

3) the most reliable hypothesis

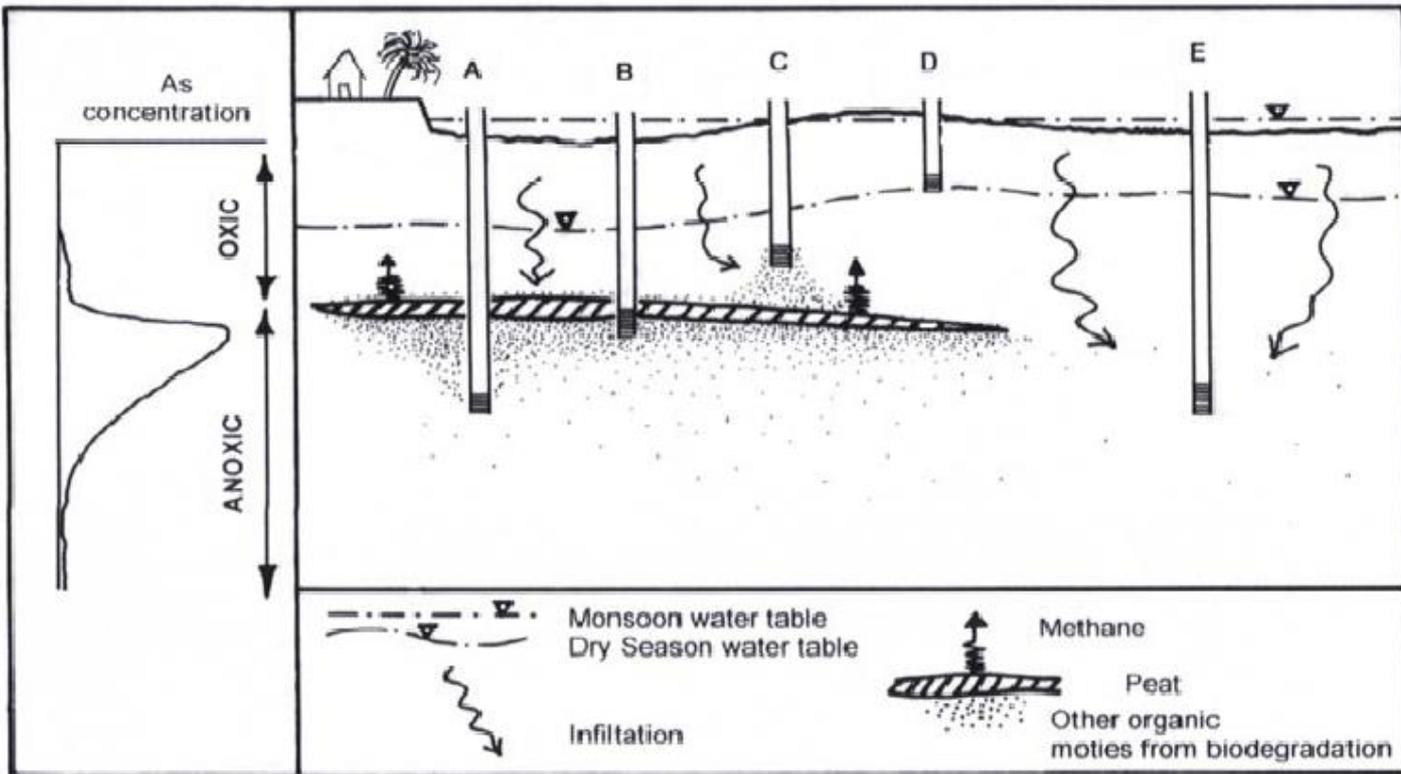
Decomposition of peat levels (Holocene *optimum climatico*, 6000 BP) mediated by bacteria



Release of Arsenic from hydrates Fe-oxides in groundwaters



What does contamination degree depend on?



From Ravenscroft et al. (2001). In: *Arsenic Exposure and Health Effects IV*. W.R. Chappell, C.O. et al. (Eds), 53-77, Elsevier Science Ltd., Oxford.

- A) low organic matter, peat level distant, less FeOOH reduction, low As content released
- B) high organic matter, peat level, high FeOOH reduction and As release
- C) migration of As and organic matter due to pumping, FeOOH reduction
- D) lower depth well, oxidized zone, no As release
- E) Contamination depends on mobility of organic matter before being consumed by FeOOH reduction and mobility of As

Arsenic in groundwaters in Italy

Kilometers
0 4 8 16 24 32



As (mean µg/L)



L'arsenico nell'acqua

Limite imposto dalla direttiva Ue del 1998 sulla sicurezza delle acque destinate al consumo

10

Limite massimo derogabile (solo per brevi periodi) secondo l'Oms

20

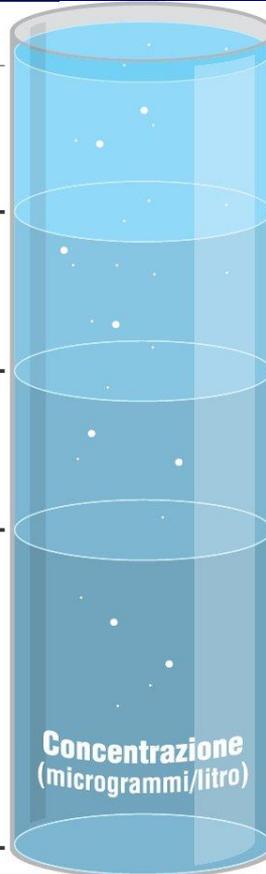
Oltre questo valore insorgono rischi di malattie quali forme particolari di cancro

30

Limite autorizzato in Italia da una deroga (scaduta il primo di gennaio) e raggiunto in 43 comuni in provincia di Viterbo

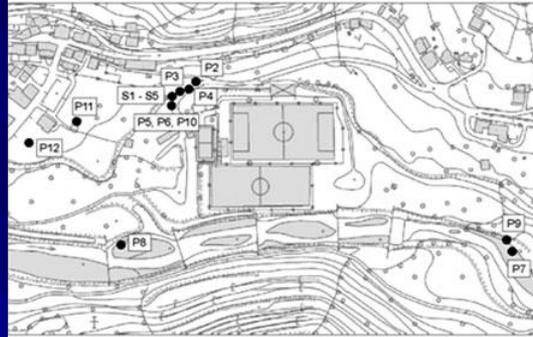
50

ANSA-CENTIMETRI

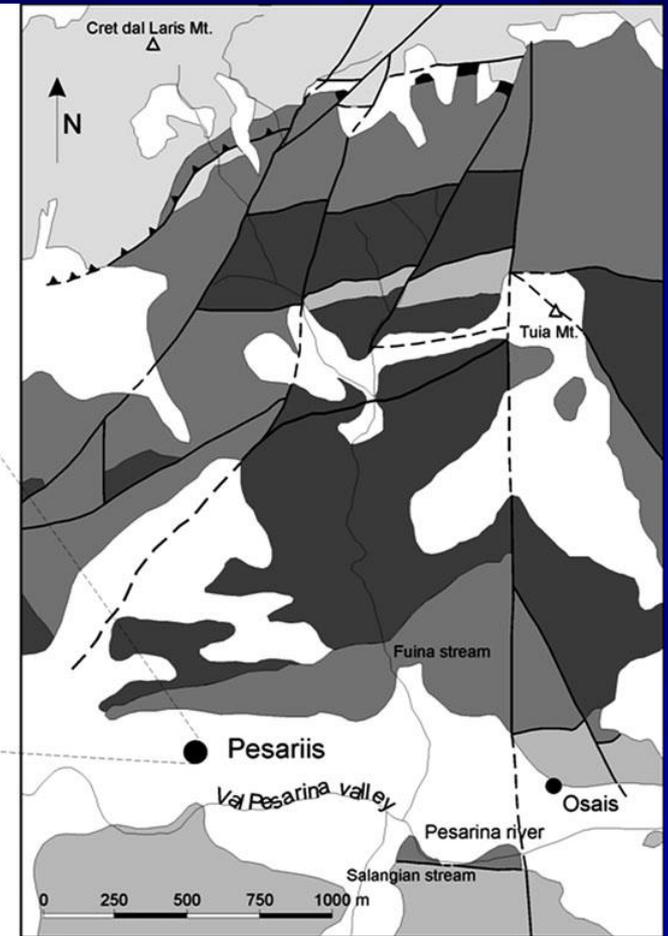


Arsenic in the drinking waters: warning at Rome and in the nearby Region - 7 aqueducts and 500 users in the Capital. On the whole, 90 villages in the Region!

Natural Arsenic contamination in waters from the Pesariis village, NE Italy



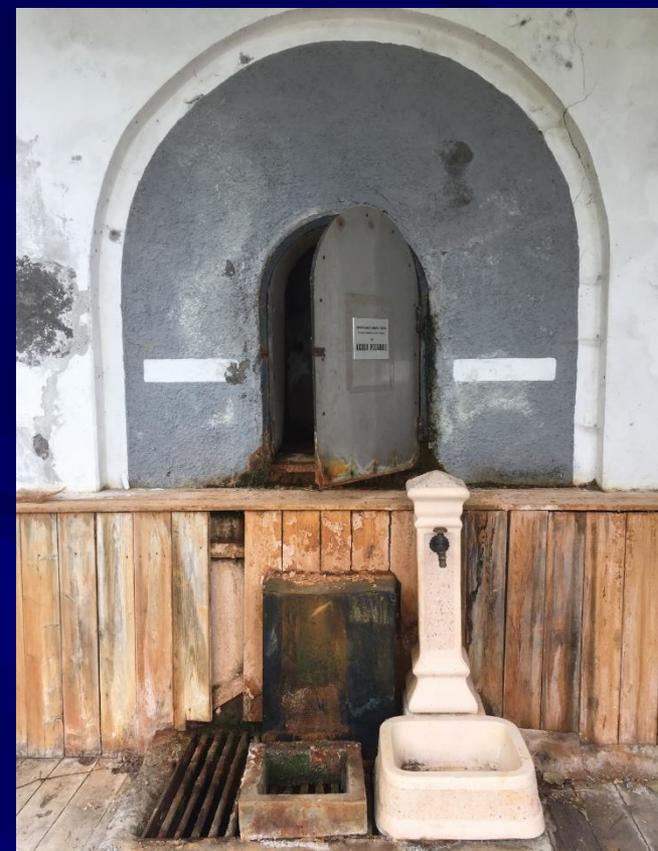
(B)



(A)

-  Alluvial and slope deposits - Quaternary
-  Schlern Dolomite - Middle Triassic
-  Buchenstein Formation - Lower Triassic
-  Serla Formation - Lower Triassic
-  Werfen Formation - Lower Triassic
-  Bellerophon Formation - Upper Permian
-  Thrusts
-  Faults





Sorgente sulfurea

As = 728 $\mu\text{g/l}$



Scolo sorgente sulfurea
As = 778 $\mu\text{g/l}$



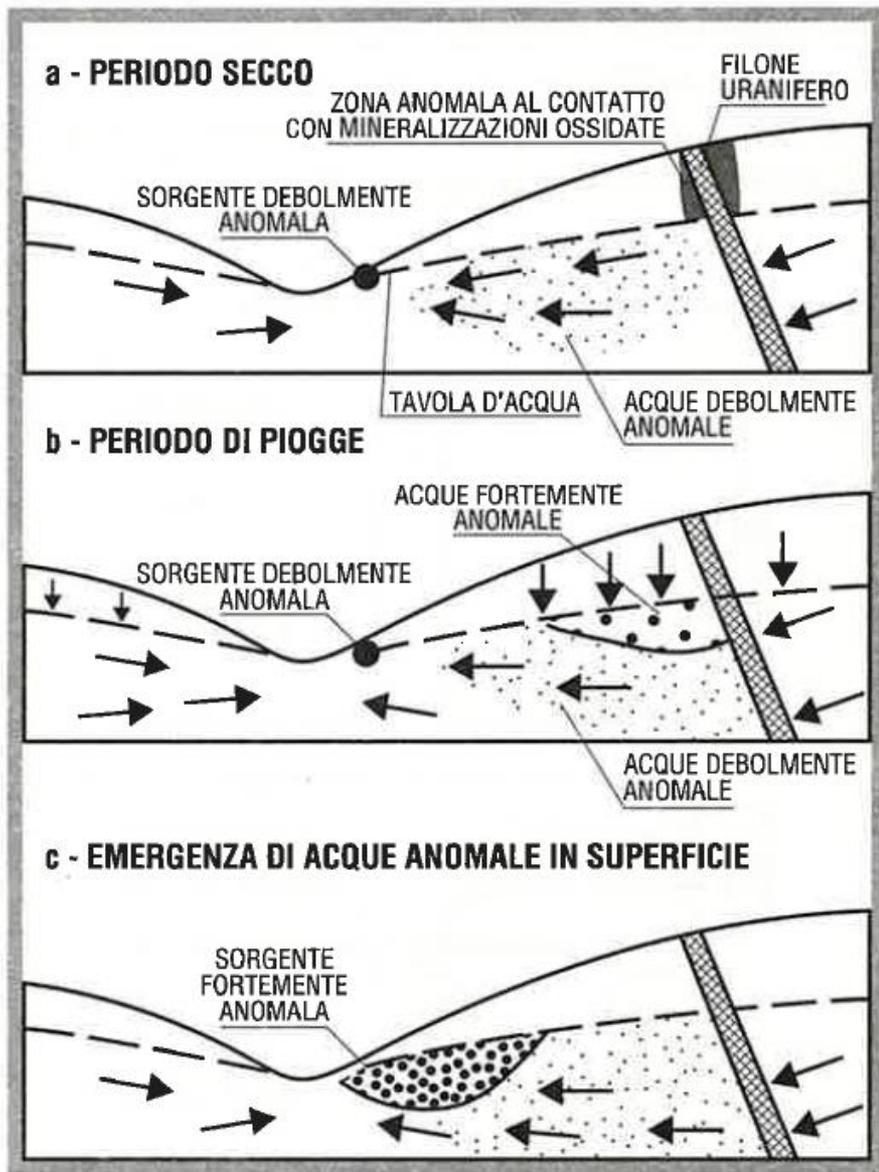


Figura 22 — Esempio di dispersione geochimica prodotta da acque sotterranee (da Germanov et al., 1958, mod.).

Interpretazione ?

Mineralizzazione data da marcasite arseniosa (FeS_2), vene di pirite in rocce dolomitiche con rara sfalerite (ZnS).

Ossidazione del minerale

Incorporazione di As in ossidi idrati di Fe amorfi

Ambiente riducente in profondità

Incremento di concentrazione di Fe e As nelle acque di falda



Carte Geochimiche

Lo strumento della carta geochimica rappresenta un utile aiuto per chi si deve occupare di problemi ambientali perché consente di stabilire, consultando semplicemente una rappresentazione cartografica, le concentrazioni naturali di molti elementi ed evidenzia altresì la presenza di situazioni anomale.

Generalmente si ottengono dal campionamento sistematico e dall'analisi di suoli e sedimenti fluviali per ricavare informazioni su tenori di elementi a scopo:

Ambientale Nutrizionale Tossicologico Giacimentologico

Alcune anomalie possono derivare dall'affioramento di litologie particolari:

- aree basiche e ultrabasiche
- aree con mineralizzazioni metallifere
- rocce argillose
- aree carbonatiche, arenacee, granitiche

Cr, Ni

As, Cd, Cu, Cr, F, Mo, Ni, Pb, U, Zn

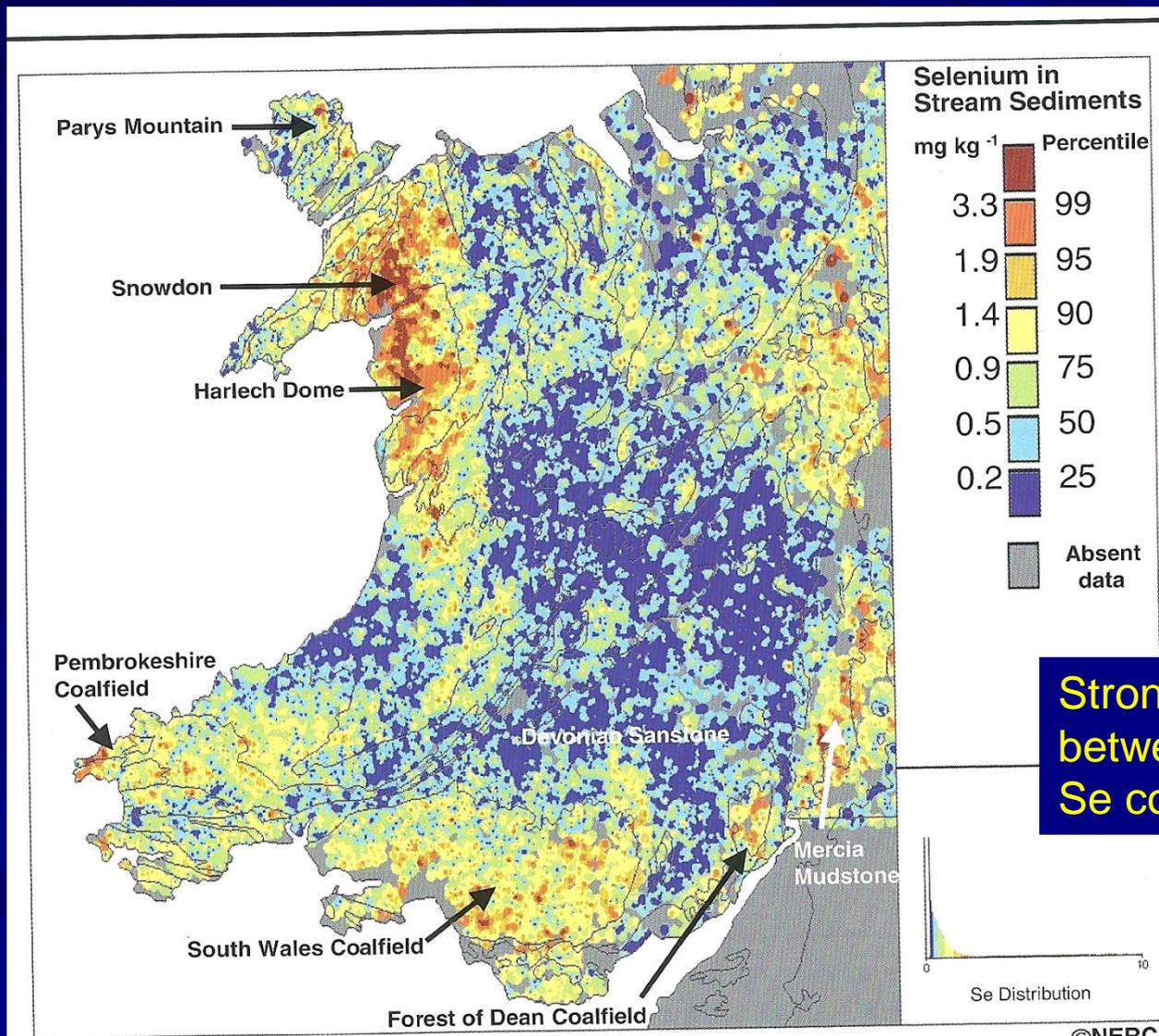
Se, Tl, Mo

Cu, Mn, Co, Cr, Zn, V

Matrici utilizzabili:

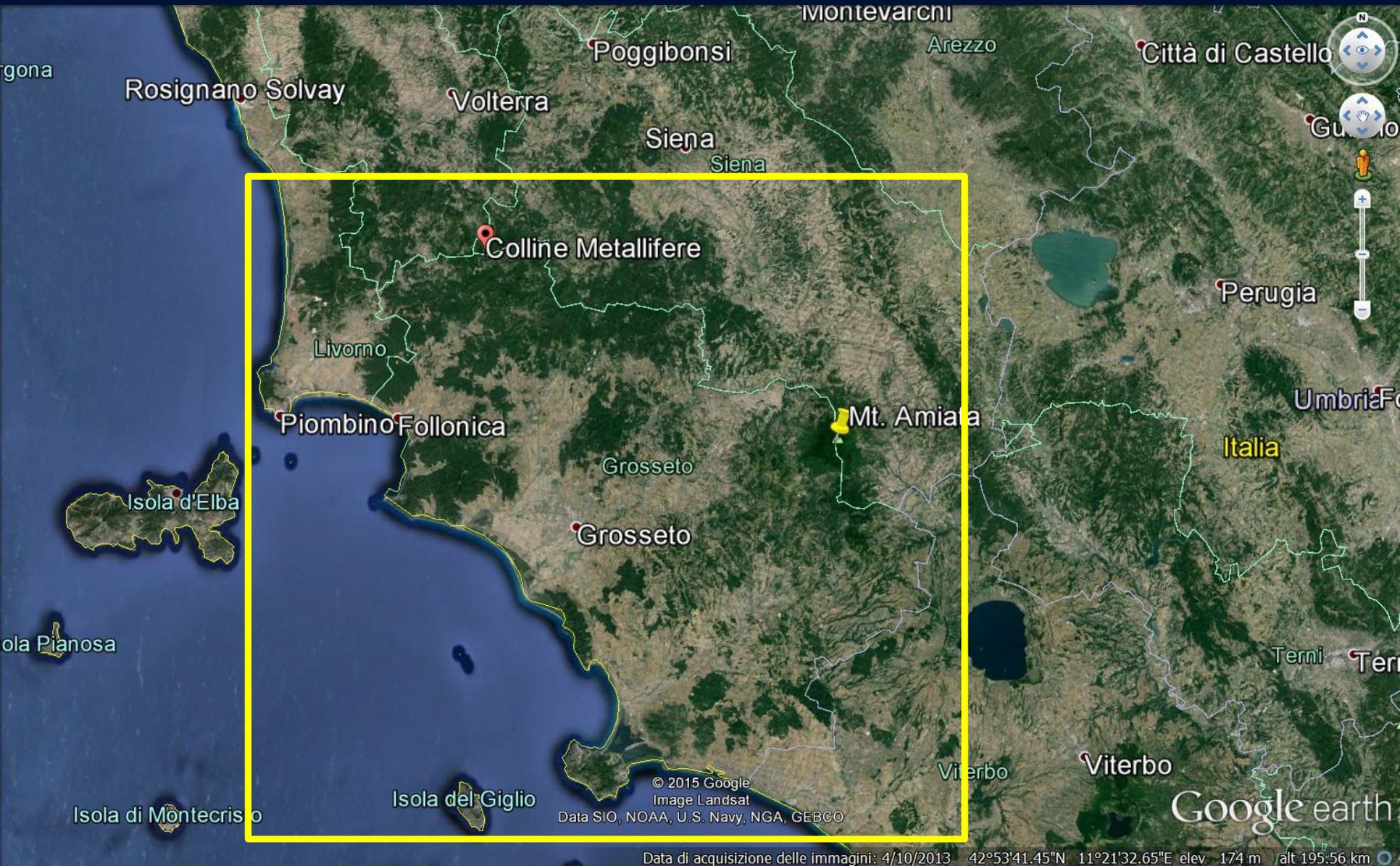
Rocce, Suoli, Sedimenti fluviali (stream sediments), Sedimenti lacustri, Acque, Piante

Selenium (curve type C)



Strong relationship between geology and Se concentrations

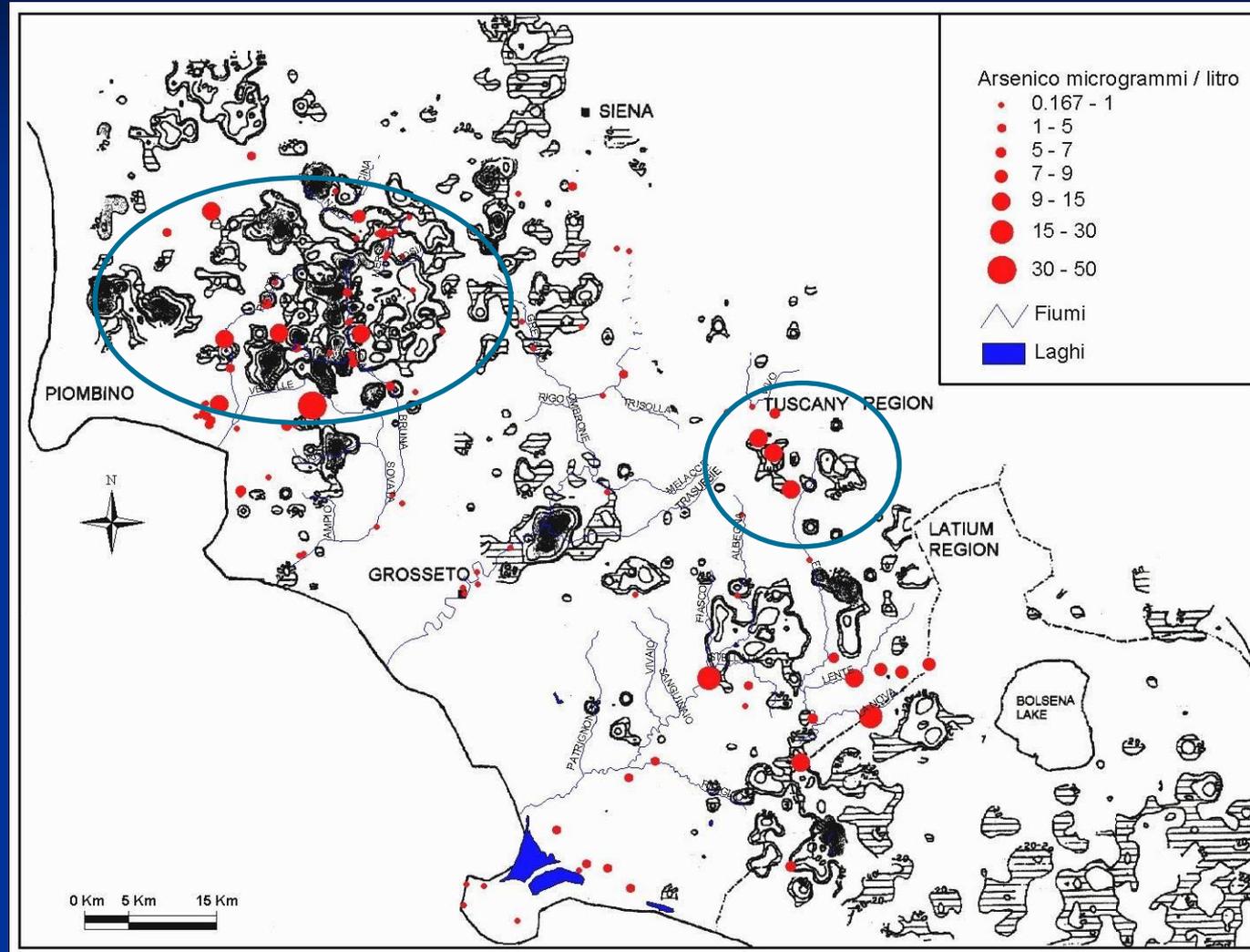
(BGS, 2000 from Fordyce, 2005)



Data di acquisizione delle immagini: 4/10/2013 42°53'41.45"N 11°21'32.65"E elev. 174 m alt. 195.56 km

Carta della distribuzione areale delle concentrazioni di Arsenico nelle acque.

Sono evidenti elevate anomalie di valori presenti in particolare in corrispondenza delle mineralizzazioni a solfuri delle Colline Metallifere, nonché dell'area geotermica e con mineralizzazioni a cinabro del Monte Amiata.



Carta della distribuzione areale delle concentrazioni di Mercurio nei sedimenti fluviali (*stream sediments*) bacino fiume Orcia (Toscana).

Stream sediments
 Valori mediana:
 Hg = 0.118 mg/kg
 As = 5.25 mg/kg

Valori massimi:
 Hg = 195 mg/kg
 As = 35 mg/kg



Miniera di Pietrinieri

Limiti di legge:
 Hg 0.3 mg/kg *
 Hg 1 mg/kg**

*limiti sedimenti
 ** limiti suoli
 uso residenziale

da Chiarantini et al. (2016)
 Water Air Soil Pollution

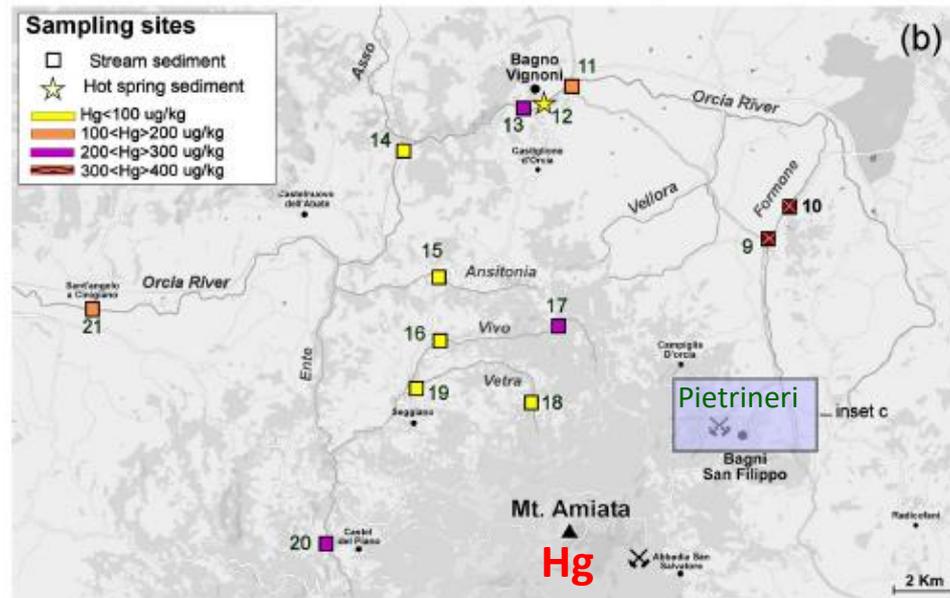
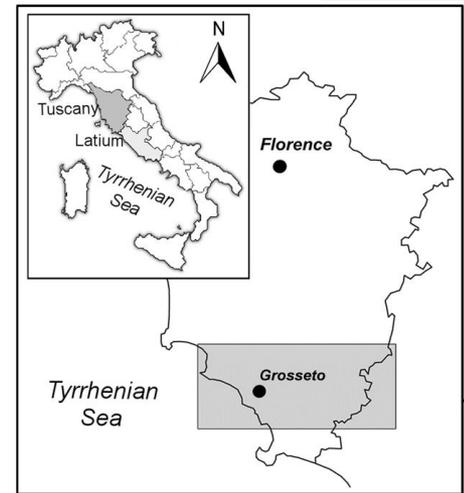
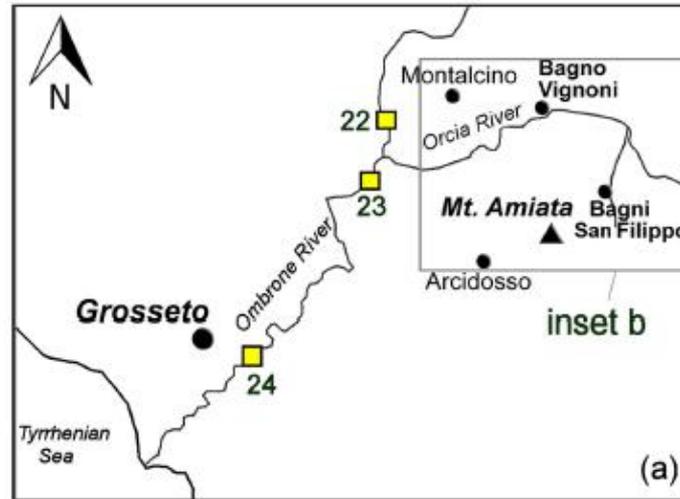


Fig. 2 a, b, c Mercury concentration and distribution at the different sampling sites

Limiti di legge:
 As 12 mg/kg*
 As 20 mg/kg**

*limiti sedimenti
 ** limiti suoli
 uso residenziale

Carta della distribuzione areale delle concentrazioni di Mercurio nei sedimenti fluviali (*stream sediments*) bacino fiume Orcia (Toscana).

Stream sediments

Valori mediana:

Hg = 0.118 mg/kg

As = 5.25 mg/kg

Valori massimi:

Hg = 195 mg/kg

As = 35 mg/kg



Miniera di Pietrinieri

Acque superficiali

< Limiti di legge:

Hg < 1 µg/L *

As < 10 µg/L *

*limiti acque potabili

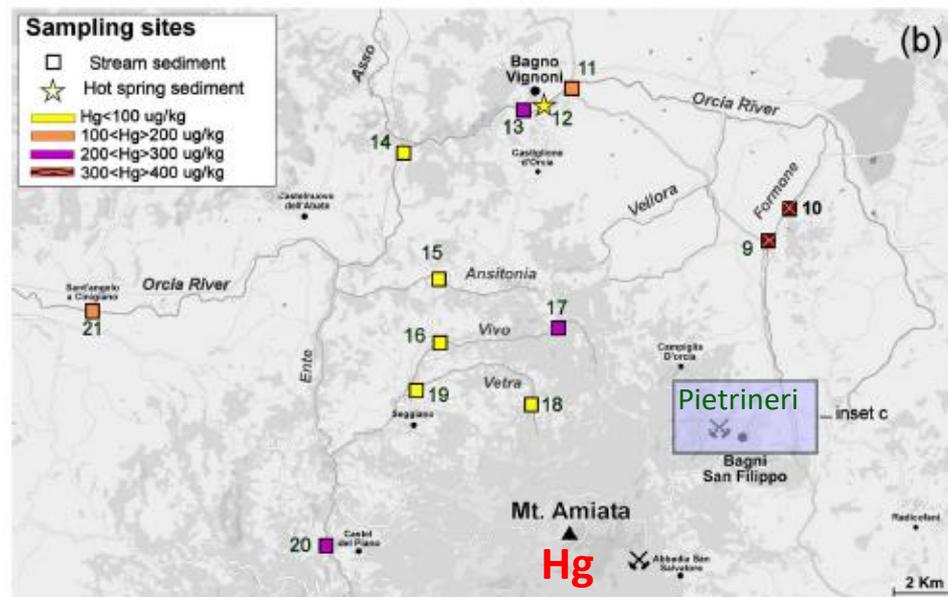
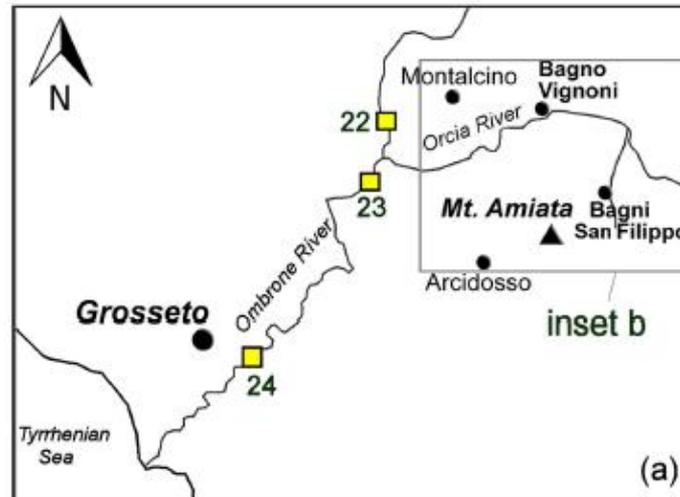


Fig. 2 a, b, c Mercury concentration and distribution at the different sampling sites

Travertino:

Hg = 23 mg/kg

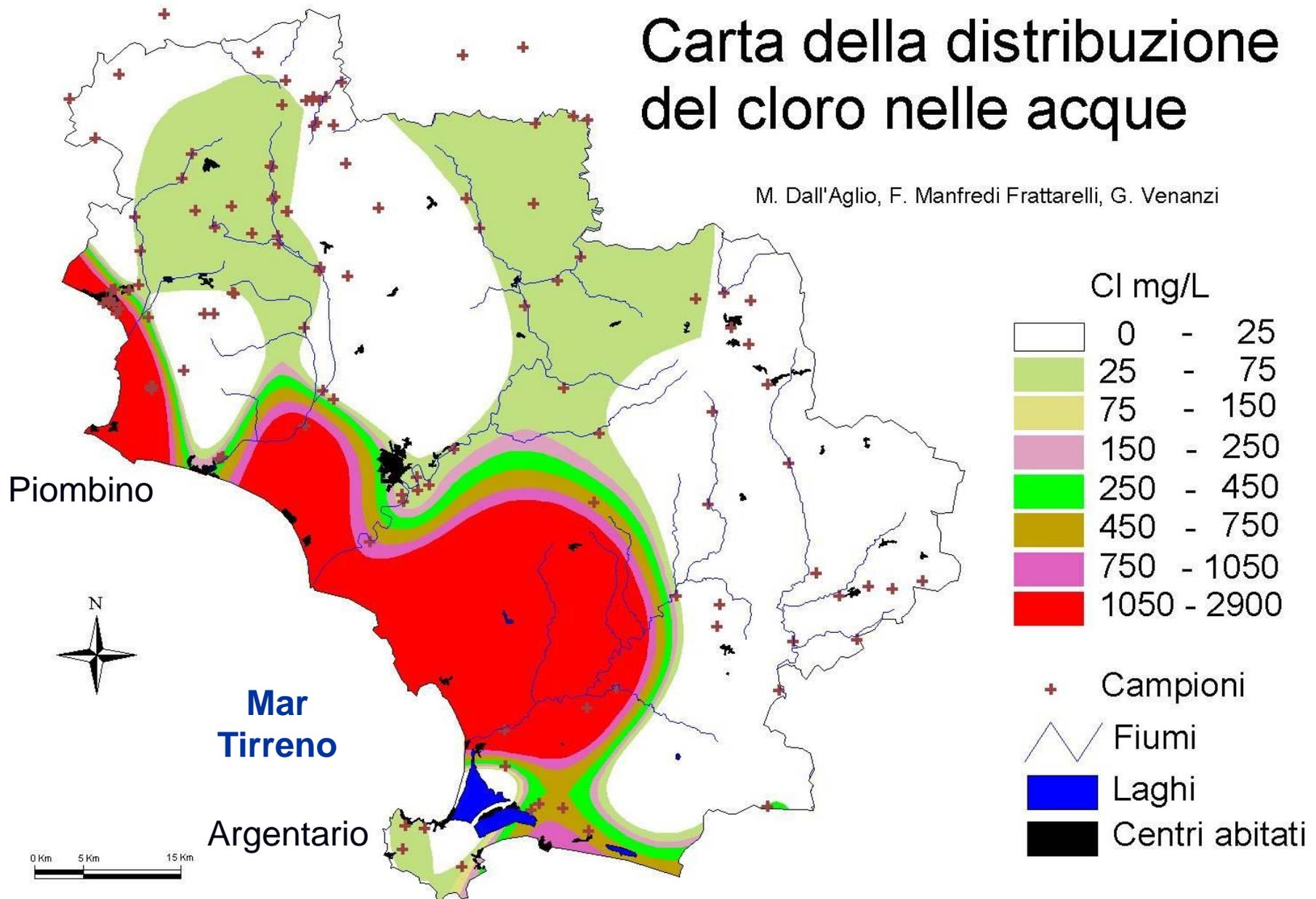
As = 358 mg/kg



Bagni S. Filippo

Carta della distribuzione del cloro nelle acque

M. Dall'Aglio, F. Manfredi Frattarelli, G. Venanzi





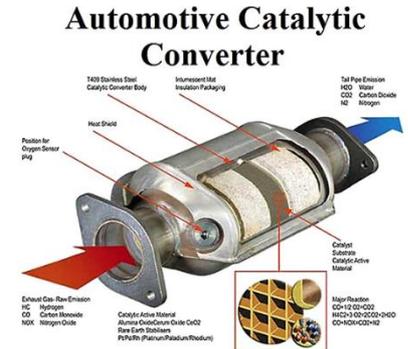
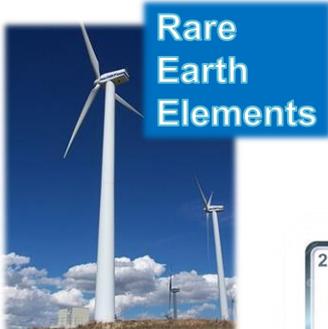
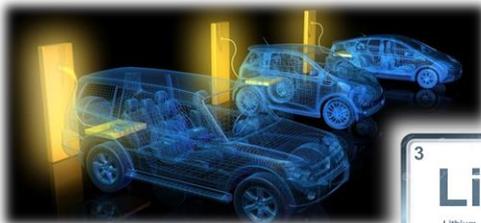
L'obiettivo dell'UE di ridurre le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 55% entro il 2030 pone l'Europa su un percorso responsabile verso il conseguimento della neutralità climatica entro il 2050.

Per raggiungere questi obiettivi è necessario che i paesi si orientino verso economie a basse emissioni di Carbonio, implementando tecnologie energetiche rinnovabili e alternative, tecnologie di cattura e stoccaggio del Carbonio e migliorando l'efficienza energetica.

Molte di queste tecnologie dipendono da materiali classificati come critici...

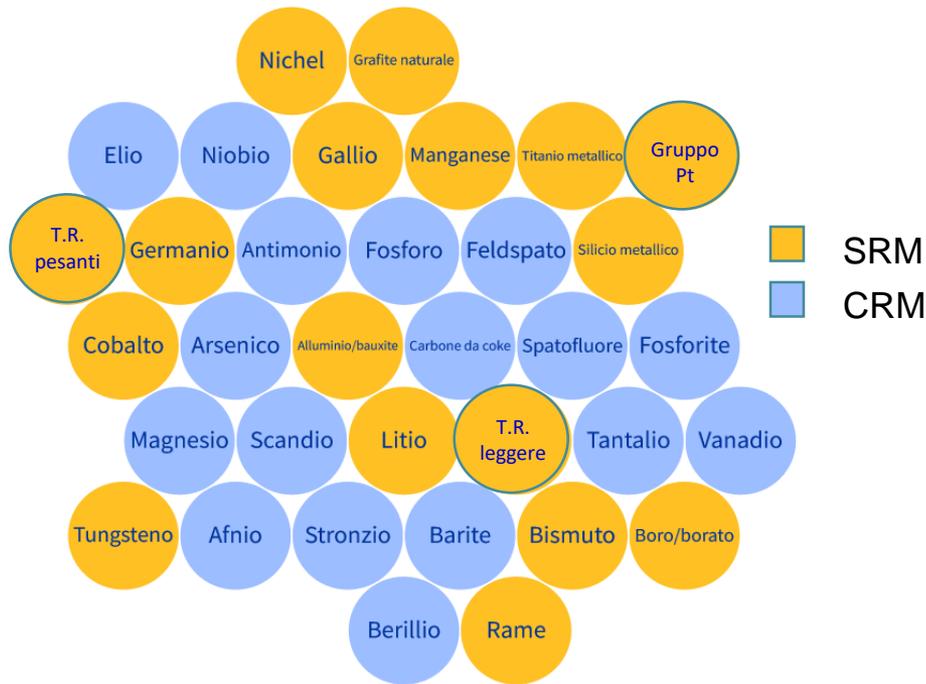
...i CRITICAL RAW MATERIALS

CRITICAL RAW MATERIALS: qualche esempio



Platinoids: Pt, Rh, Pd

La **Commissione Europea (Critical Raw Material Act, marzo 2023)** ha fornito la lista aggiornata delle **34 materie prime critiche (CRMs)** di cui **16 (17*)** sono considerate risorse **strategiche (SRMs)** per la **transizione digitale e lo sfruttamento delle energie rinnovabili**, nonché per le loro applicazioni nei settori della **difesa, dell'esplorazione spaziale e della sanità**.



Quali i criteri considerati ?

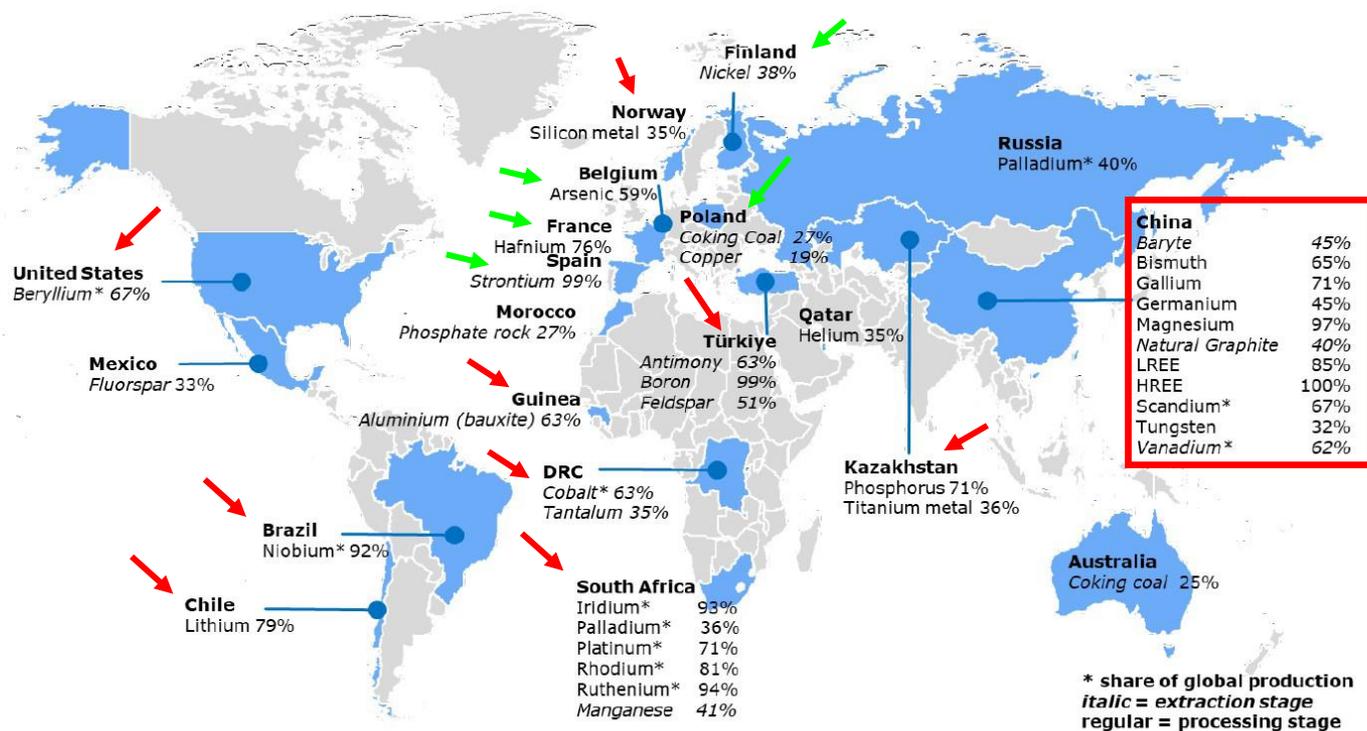
- **Importanza economica della risorsa (Economic Importance, EI)**
- **Rischio di approvvigionamento (Supply Risk, SR)**



Contesto geopolitico dinamico

*Il Consiglio (giugno 2023) ha chiesto di includere Al/bauxite

Principali fornitori di CRM alla UE (2023)



Source: European Commission, 2023

La dipendenza dell'UE dalle importazioni di CRM è estremamente elevata e talvolta raggiunge il 100% (ad esempio per gli elementi delle terre rare - REE)

La salvaguardia dell'economia della UE (transizioni verde e digitale) passa da eventuali interruzioni delle forniture di materie prime critiche e strategiche.

Il Consiglio Europeo, sulla base del **Critical Raw Materials Act**, indica 4 obiettivi per limitare la dipendenza dai pesi terzi entro il 2030.



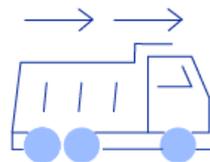
Il 10% delle materie critiche (CRMs) e strategiche (SRMs) utilizzate dai paesi membri dell'UE dovrà essere estratto da miniere europee;



Il 15% (20%*) dovrà derivare dalle attività di recupero e riciclo;

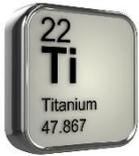


Il 40% (50%*) del consumo annuo di CRMs dovrà essere trasformato in Europa;



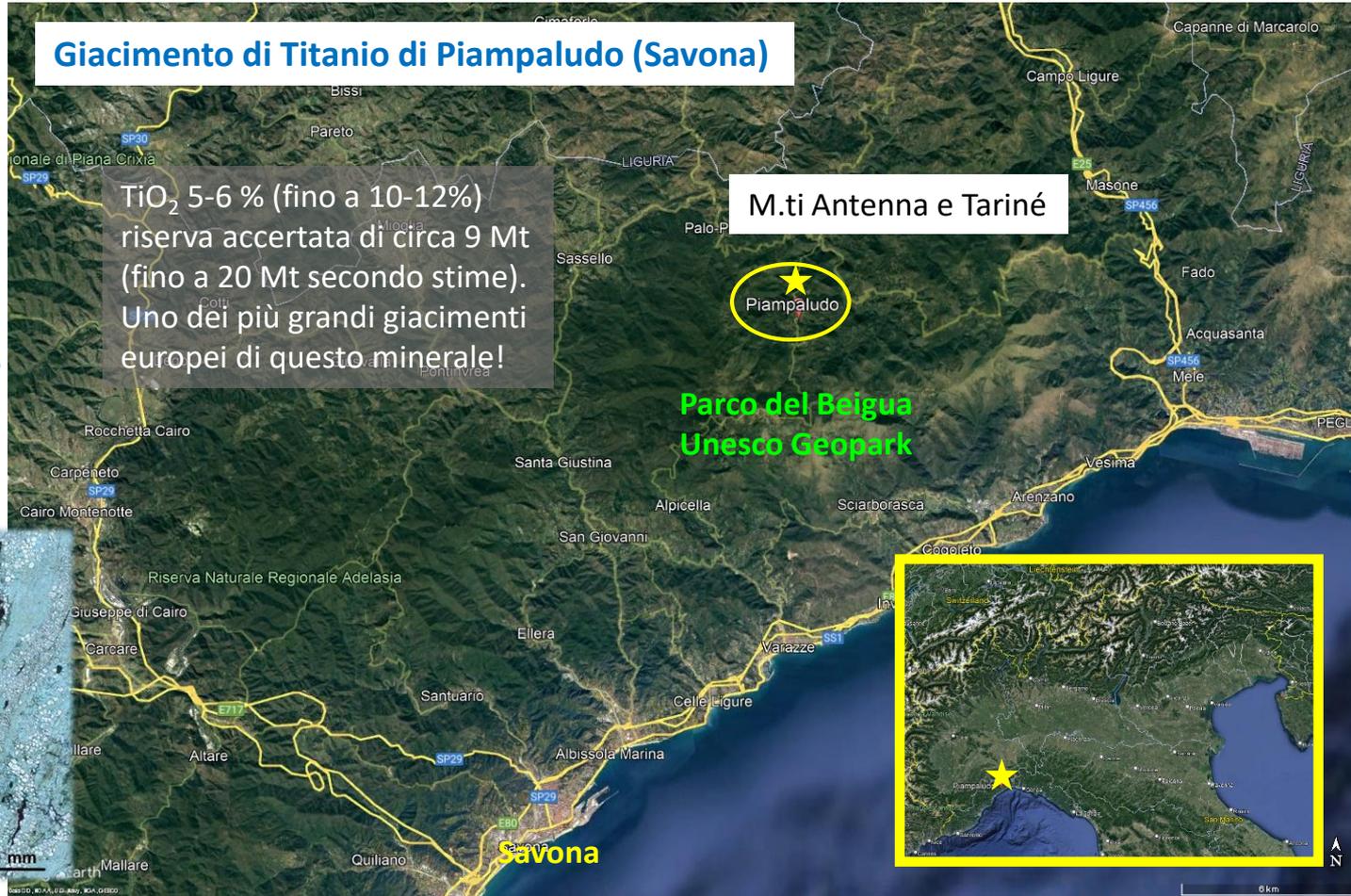
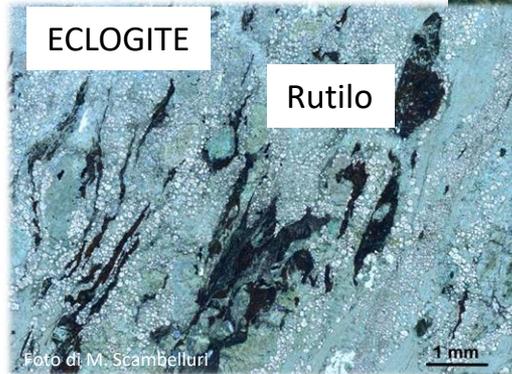
Diversificare le importazioni di materie prime strategiche e nessun paese terzo dovrà fornire oltre il 65% del consumo annuo dell'UE per ciascun CRM;

*Il Consiglio (giugno 2023) ha chiesto di innalzare la soglia



Rocce ofiolitiche

- Durezza elevata
- Elevati costi di estrazione
- Rischio ambientale e sanitario (amianto)



Litio: tutti lo vogliono, tutti lo cercano !

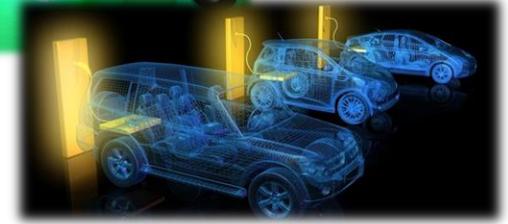
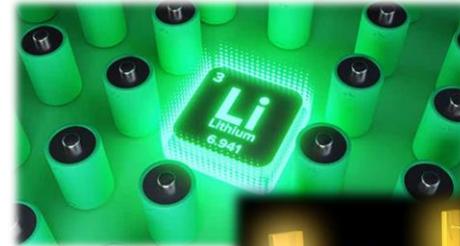
Salar de Uyuni (Bolivia)

L'oro bianco

Salar de Atacama
(Chile)

Brine o salamoie (*salar*s)
(es. Sud America) > 60%

Salar de l'Hombre Muerto
(Argentina)



- Grandi estese sotterranee di sale
- Estrazione costosa del Li_2CO_3
- Tecniche estrattive invasive: elevato consumo d'acqua e produzione di rifiuti tossici
- Danni ambientali

Un deserto bianco di oltre 10.000 km², a 3650 metri di quota!

Lithium Occurrence in Italy—An Overview

Andrea Dini ¹, Pierfranco Lattanzi ², Giovanni Ruggieri ^{2*} and Eugenio Trumpy ¹

Litio: dove in Italia ?

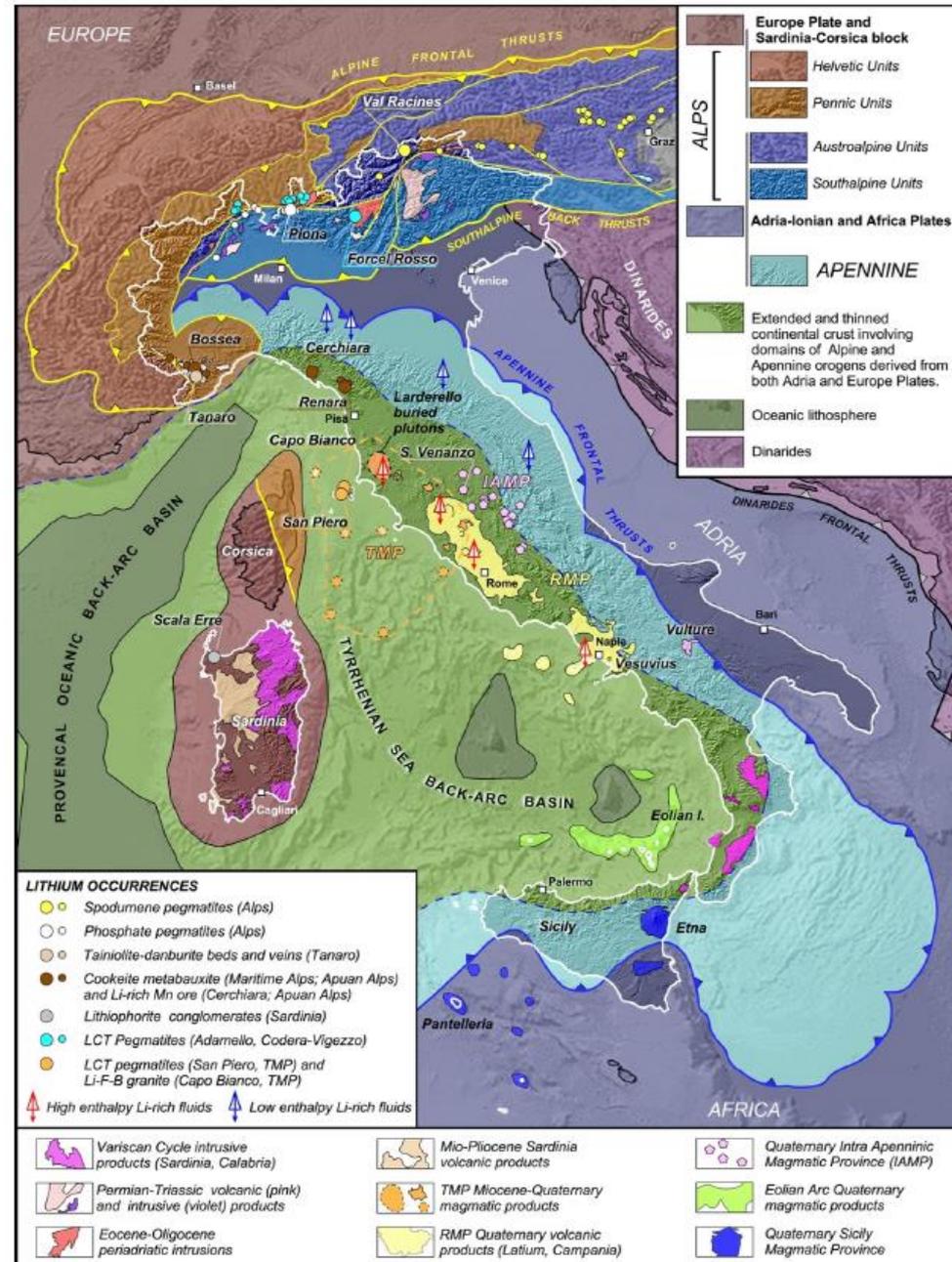
Potenziati aree estrattive:

Pegmatiti a spodumene del Permo-Triassico nelle unità Australpine delle Alpi Centrali

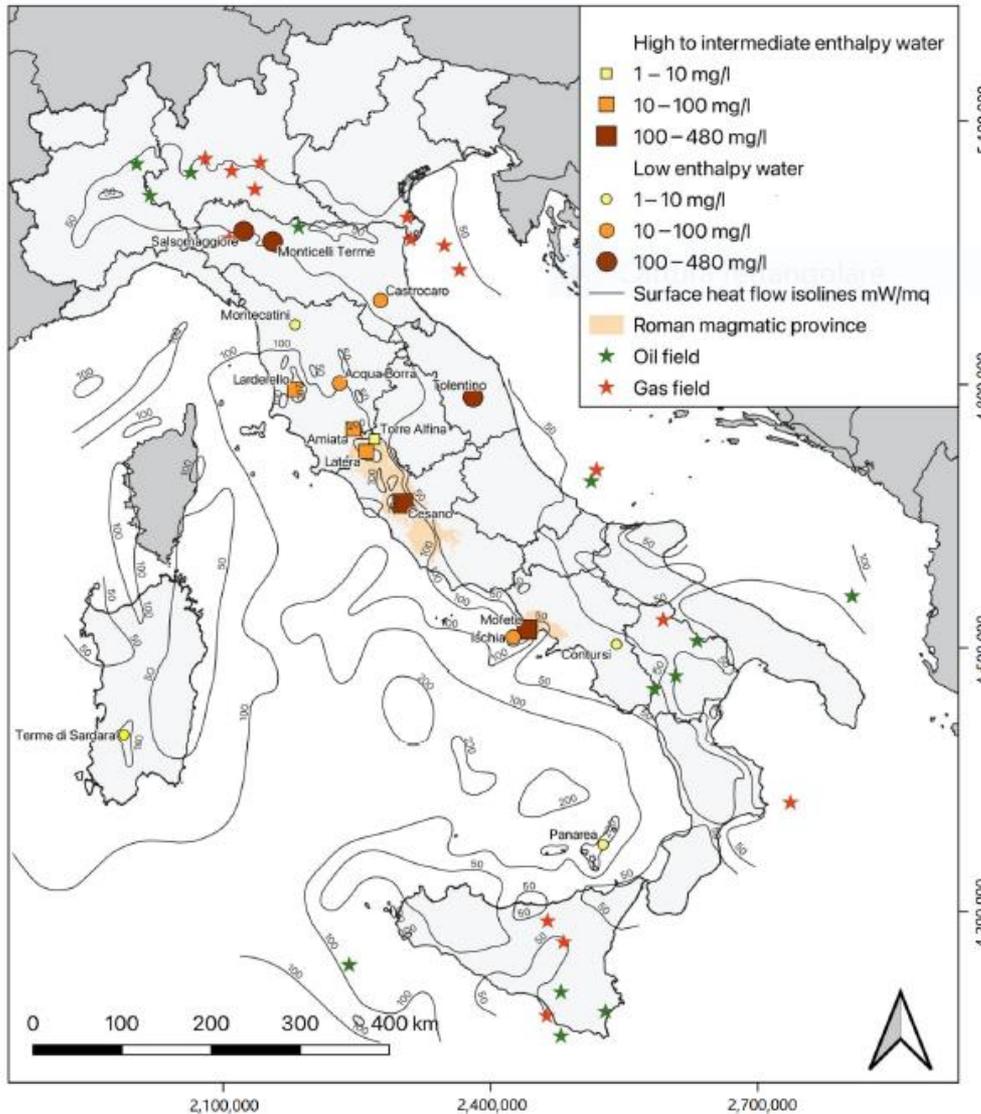


Pegmatiti del Terziario (Isola d'Elba e Alpi Centrali)

Particolarità: rocce magmatiche Terziario-Quaternarie della provincia Toscana-laziale presentano elevate concentrazione di Li (graniti 350 µg/g di Li, aplite di Capo Bianco (Elba) 1000 µg/g)



Litio in Italia: il potenziale più promettente



Il potenziale più promettente sembra essere associato ai fluidi del sottosuolo.

I fluidi ad alta entalpia nei campi geotermici possono contenere fino a 480 mg/L di Li.

Anche le acque termali a bassa temperatura possono contenere una quantità significativa di Li (>10 mg/L).

In prospettiva, difficile ma non impossibile, si potrebbe considerare l'iniezione profonda di acqua per interagire con le rocce magmatiche ed estrarne il Li.

Source: Dini et al. (2022), Minerals

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

Table of Radioactive Isotopes

Naturally occurring radioactive isotopes are indicated by a blue mass number. Half lives are in parentheses where s, m, h, d, and y stand for seconds, minutes, hours, days and years respectively. The symbols describing the mode of decay and resulting radiation are defined as follows:

- α alpha particle
- β⁻ beta particle
- β⁺ positron
- K K-electron capture
- L L-electron capture
- SF spontaneous fission
- γ gamma ray
- e⁻ internal electron conversion

VIIIA
2 4.0026
He
Helium

GROUP IA

1 1.00797
H
Hydrogen

3 6.939
Li
Lithium

11 22.9898
Na
Sodium

19 39.102
K
Potassium

37 85.47
Rb
Rubidium

55 132.905
Cs
Cesium

87 (223)
Fr
Francium

IIA

4 9.0122
Be
Beryllium

12 24.312
Mg
Magnesium

20 40.08
Ca
Calcium

38 87.62
Sr
Strontium

56 137.34
Ba
Barium

88 (226)
Ra
Radium

Ac 227(228)β⁻α
Ag 110(248)β⁻γ
111(17.3d)β⁻γ
Am 241(1458)α_K,β⁻γ
242(16.0h)α_K,β⁻γ
243(8000y)α_K,β⁻γ
As 76(26.7h)β⁻γ
77(39h)β⁻γ
At 210(8.3h)K,α_K,β⁻γ
211(7.2h)K,α_K,β⁻γ
Au 198(2.69d)β⁻γ
Ba 131(12d)K,β⁻γ
137(2.55y)K,β⁻γ
Bi 210(5d)β⁻γ
Bk 245(9300y)α_K,β⁻γ
249(314d)α_K,β⁻γ
Br 82(36h)β⁻γ
C 14(5700y)β⁻γ
Ca 41(8.10⁴y)K
45(165d)β⁻γ
47(4.5d)β⁻γ
Ce 140(138.4d)β⁻γ
142(13.8d)β⁻γ
144(285d)β⁻γ
Cf 249(350y)α_K,β⁻γ
251(800y)α_K,β⁻γ
Cl 36(3.10⁴y)β⁻γ
Co 58(71.1d)K,β⁻γ
60(5.27y)β⁻γ
Cr 51(27d)K,β⁻γ
Cs 134(2.0y)β⁻γ
135(3.010⁶y)β⁻γ
137(30y)β⁻γ
Cu 64(12.8h)K,β⁻γ
Eu 253(20d)α_K,β⁻γ
254(1y)α_K,β⁻γ
Eu 154(1.6y)β⁻γ
155(1.8y)β⁻γ
Fe 55(2.6y)K
59(45d)β⁻γ
Fm 255(20h)β⁻γ
Fr 223(22m)β⁻γ
Ga 72(14.1h)β⁻γ
Gd 153(236d)K,β⁻γ
159(18h)β⁻γ
Ge 73(111d)K
H 3(12.3y)β⁻γ
Hf 181(145d)β⁻γ
Hg 197(65h)K,β⁻γ
203(47d)β⁻γ
Ho 166(27.3h)β⁻γ
I 129(1.07y)β⁻γ
131(8.05d)β⁻γ
In 114(50d)β⁻γ
Ir 192(74.4d)β⁻γ
K 40(1.07y)β⁻γ
42(12.4h)β⁻γ
La 140(40.2h)β⁻γ
Lu 176(10.3y)β⁻γ
177(6.8d)β⁻γ
Md 256(90m)K,SF
Mo 99(67h)β⁻γ
Na 22(2.6y)β⁻γ
24(1.5h)β⁻γ
Nd 147(11.1d)β⁻γ
Ni 63(1.25y)β⁻γ
59(8.10⁴y)K
Np 237(2.2x10⁶y)α_K,β⁻γ
239(2.33d)β⁻γ
Os 191(11.5d)β⁻γ
P 32(14.2d)β⁻γ
Pa 231(34000y)α_K,β⁻γ
Pb 210(19.4y)α_K,β⁻γ
202(10y)β⁻γ
Pd 103(17d)K,β⁻γ
Pm 147(2.6y)β⁻γ
Po 210(138.4d)α_K,β⁻γ
209(103y)α_K,β⁻γ
Pr 143(13.8d)β⁻γ
Pt 197(18h)β⁻γ
Pu 242(3.8x10⁴y)α_K,β⁻γ
241(13y)β⁻γ
239(24300y)α_K,β⁻γ
Rn 226(1620y)α_K
Re 86(18.6d)β⁻γ
Rb 87(48.8d)β⁻γ
186(3.7d)β⁻γ
Rn 222(3.82d)β⁻γ
Ru 101(3.7y)β⁻γ
97(2.9d)K,β⁻γ
S 35(88d)β⁻γ
Sb 122(2.8d)β⁻γ
124(60d)β⁻γ
Se 78(120d)K,β⁻γ
Sm 153(47h)β⁻γ
145(340d)K,β⁻γ
Sn 113(119d)K,L,β⁻γ
Sr 90(28y)β⁻γ
89(51d)β⁻γ
85(64d)K,β⁻γ
Ta 182(11.5d)β⁻γ
Tb 160(73d)β⁻γ
Tc 99(2x10⁵y)β⁻γ
79(10y)K
Te 127(9.3h)β⁻γ
Th 232(1.4x10¹⁰y)α_K,β⁻γ
228(1.91y)β⁻γ
Tl 204(3.81y)β⁻γ
Tm 170(134d)β⁻γ
U 238(4.5x10⁹y)α_K,β⁻γ
234(2.5x10⁴y)α_K,β⁻γ
235(7.1x10⁸y)α_K,β⁻γ
233(1.6x10⁴y)α_K,β⁻γ
W 185(75d)β⁻γ
Y 90(64h)β⁻γ
Yb 173(4.2d)β⁻γ
169(31d)K,β⁻γ
Zn 65(245d)K,β⁻γ
Zr 95(65d)β⁻γ
93(9x10⁴y)β⁻γ

IIIB

Sc 44.956
Ti 47.88
V 50.942
Cr 51.996
Mn 54.938
Fe 55.847
Co 58.933
Ni 58.71
Cu 63.54
Zn 65.37

IVB

Scandium

VIB

Vanadium

VIII

Cobalt

IB

Copper

IIB

Zinc

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

IIIB

Scandium

IVB

Titanium

VIB

Vanadium

VIII

Cobalt

IB

Copper

IIB

Zinc

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIIIA

Neon

VIA

Oxygen

VIIA

Fluorine

VIIIA

Neon