



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI MILANO



# Il ciclo del litio nella crosta continentale



*Ouro Preto - Brasile*

# Struttura della presentazione

## INTRODUZIONE

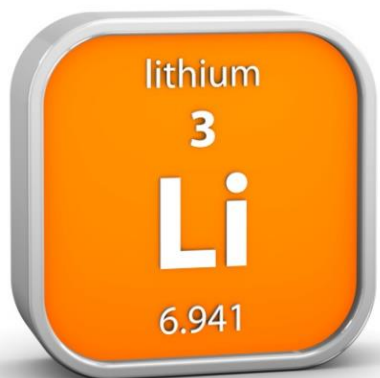
- Il litio: materia prima critica
- Rilevanza economica: a cosa serve?
- Litio e «green economy»

## RESERVOIRS

- Pegmatiti a Li-Cs-Ta ←
- Laghi salati (Salar) – «brine»
- Depositi di minerali argillosi
- Depositi non-convenzionali da «brine»

## CONCLUSIONI E «INVETTIVA»





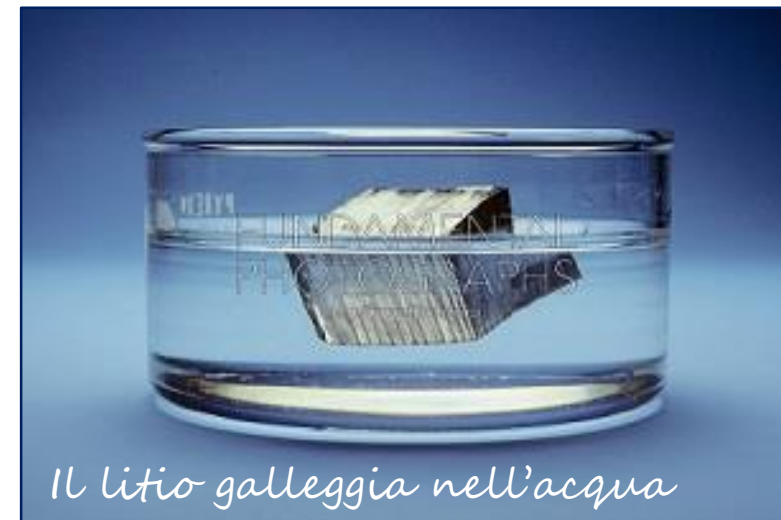
## Carta di identità

Metallo – [λίθος – «lithos»] - Raggio ionico piccolo

Elemento solido più leggero ( $\rho = 0.543 \text{ g/cm}^3$ )

Elettropositivo: cede un elettrone ( $\text{Li}^+$ )

Fluido-mobile - Due isotopi  $^6\text{Li}$  (7.6%) e  $^7\text{Li}$  (92.4%)



È una **materia prima critica** (*Critical Raw Material; CRM*)

**CRM** - *Materie prime di importanza economica strategica per l'UE con alto rischio di fornitura*

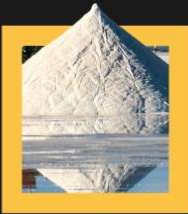
Ogni tre anni l'EU produce: «**Study on the Critical Raw Material for the EU**»

Parametri: Importanza Economica e Rischio di Fornitura



Nel 2023 l'UE propone un'azione legislativa con il **Critical Raw Material act** (Marzo 2023)

*“Today, the Commission proposes a comprehensive set of actions to ensure the EU's access to a secure, diversified, affordable and sustainable supply of critical raw materials...”*



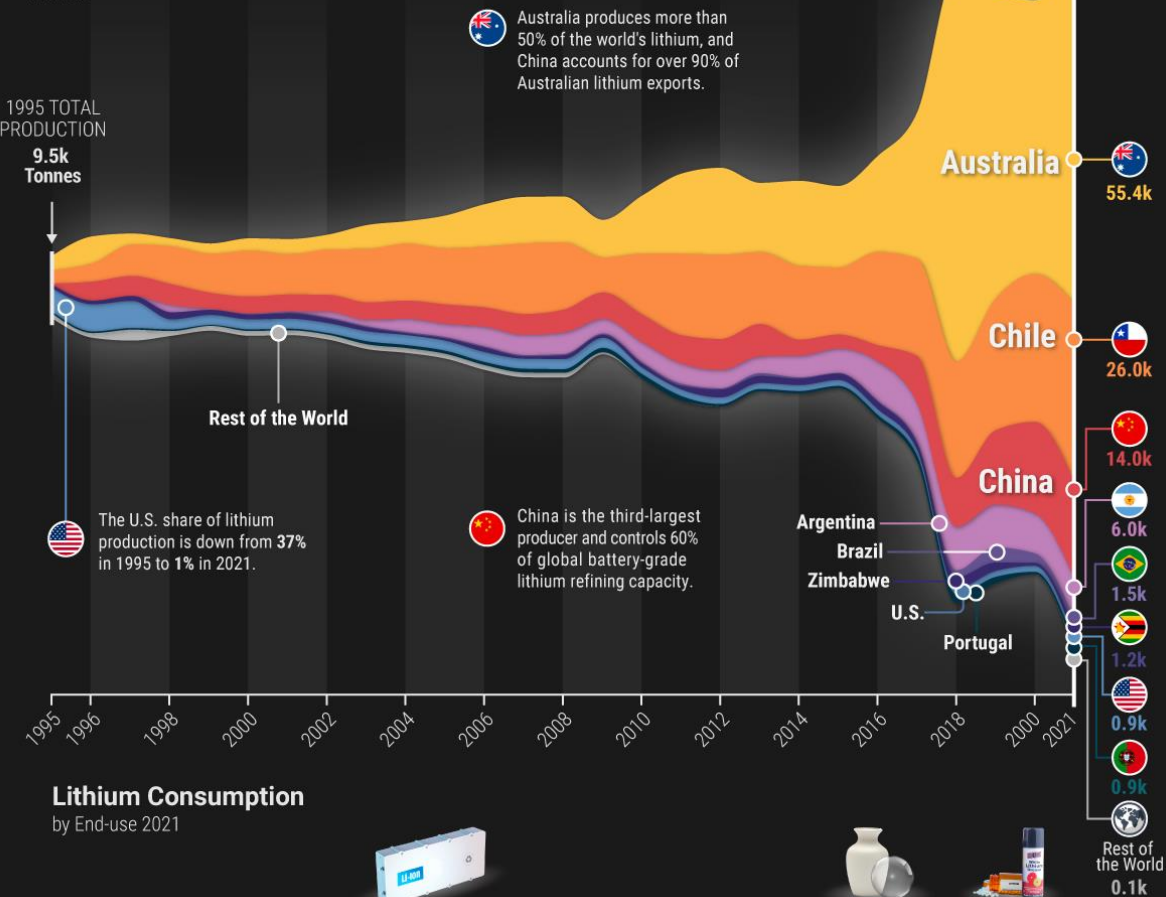
## 25 YEARS OF LITHIUM PRODUCTION

Global lithium production has quadrupled since 2010.

Which countries produce the most lithium, and how have they changed over time?

### Mine Production of Lithium 1995-2021

Tonnes



### Lithium Consumption

by End-use 2021



74%

Batteries



14%

Ceramics and glass



12%

Other

## Litio: oro bianco

“Il litio e le terre rare saranno presto più importanti di petrolio e gas”

*U. von der Leyen (Presidente della Commissione europea)*

Domanda mondiale in costante crescita

Produzione globale nel 2023 ca. 110000 tonnellate

### Cosa sta succedendo in UE?

- L'81% del litio è importato (Cile)
- Il 100% è processato fuori dall' EU (Cina, Cile)
- Percentuale di riciclo (EOL-RIR) = 0%
- Lo 0.3% del litio viene estratto in Portogallo

*= vulnerabilità strategica*

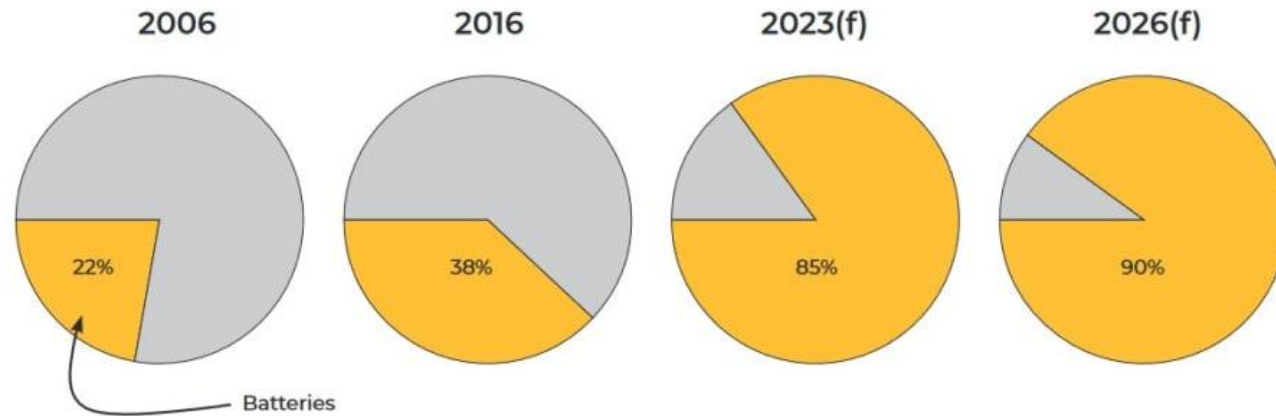
# La febbre dell'oro

Impieghi: Industria ceramica e vetraria (7%), lubrificanti (4%) industria farmaceutica (1%), altri impieghi (8%), batterie elettriche a ioni di litio (LIB, 80%)

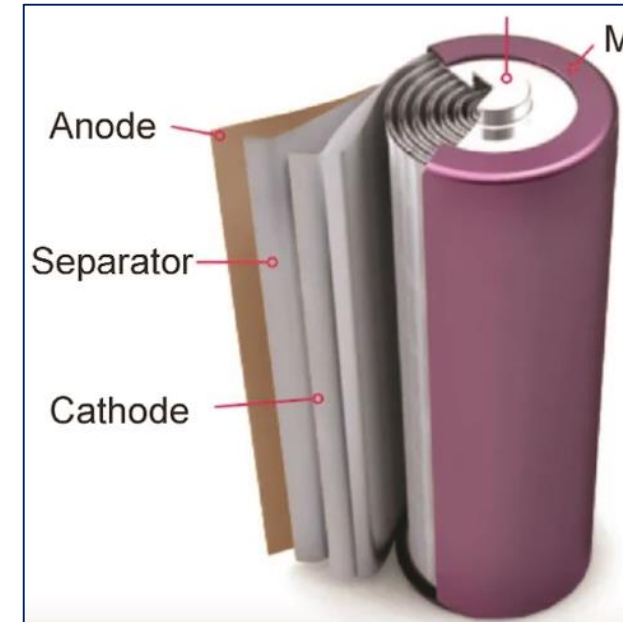


## Battery Powered: 20 years of lithium demand

Lithium (LCE) demand from 2006 to 2026(f): how lithium ion batteries for EVs have grown to dictate the lithium industry



SOURCE: BENCHMARK MINERAL INTELLIGENCE



*Batterie elettriche a ioni di litio da non confondersi con le batterie a litio metallico*

**Il mercato del litio è dominato dall'espansione nell'utilizzo delle batterie a ioni di litio**

# Batterie a ioni di litio

Sole e vento sono sorgenti di energia intermittenti –  
Come immagazzinare questa energia? → [batterie ricaricabili](#)

Nobel in chimica (2019): *Yoshino, Goodenough, Whittingham*

**Anodo:** litio metallico in strati di grafite

**Catodo:** ossidi di cobalto

## La batteria si scarica

Li perde un elettrone ( $e^-$ ) e si genera una corrente.  
Formazione di ioni  $Li^+$ . Il  $Li^+$  migra verso il catodo

## La batteria si ricarica

E' fornita corrente per muovere  $Li^+$  dal catodo all'anodo e formare Li

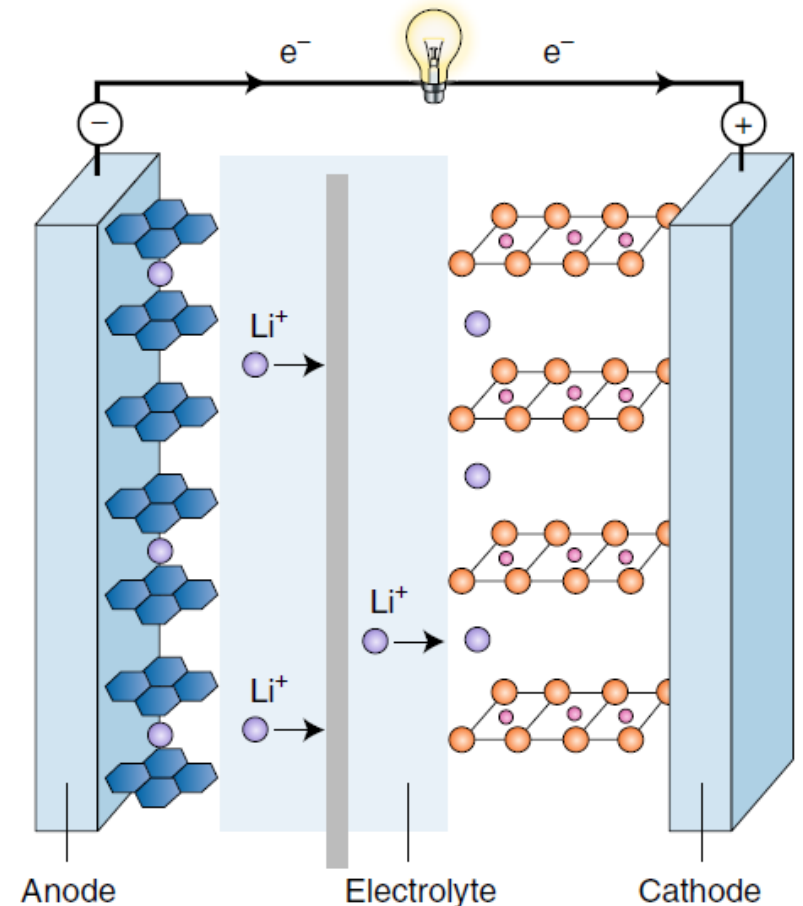


Fig. 1 | Components of a rechargeable Li-ion battery.

Da dove viene l'energia con cui ricarichiamo le nostre batterie (sorgenti sostenibili o combustibili fossili?)

## ELEMENTS

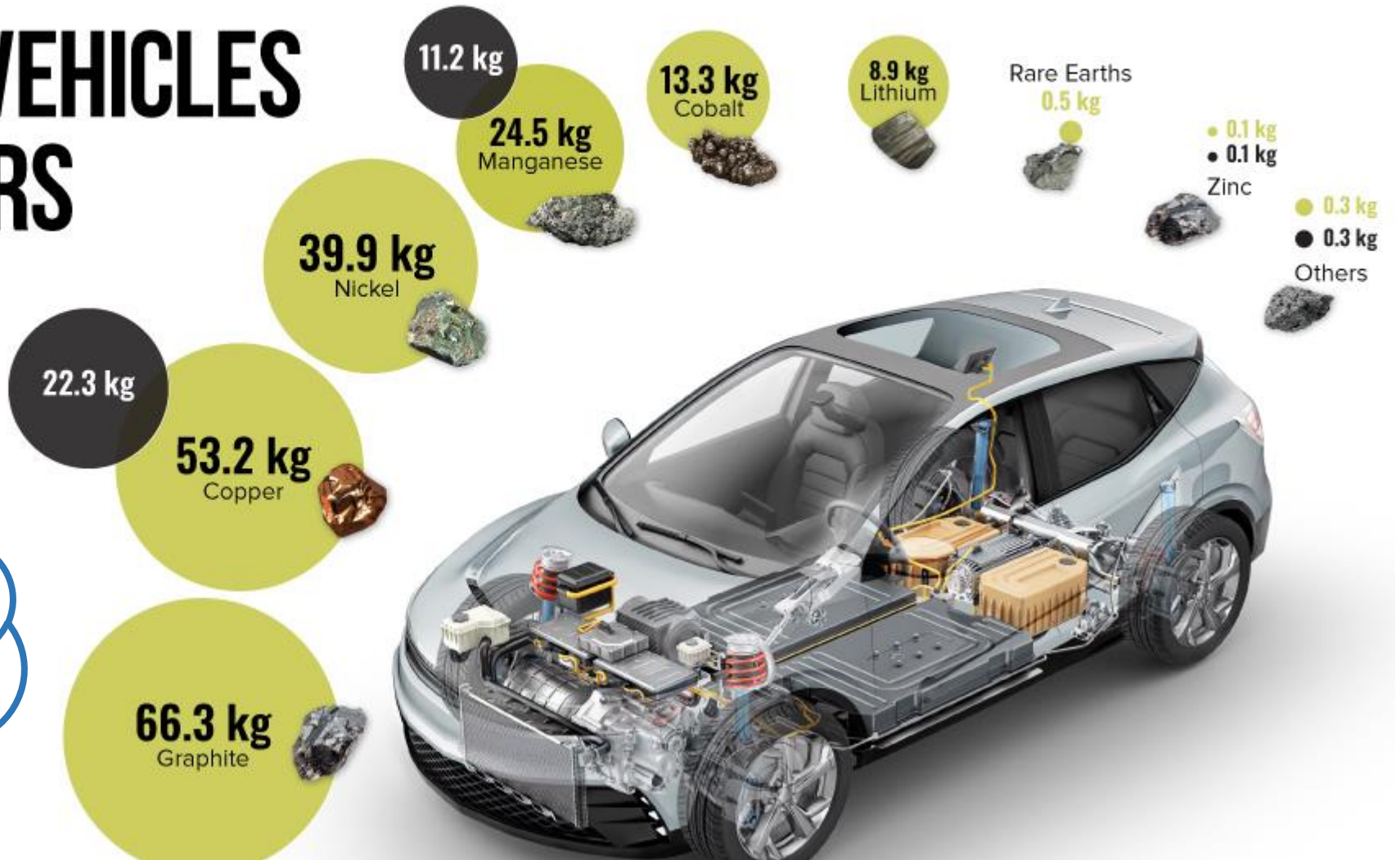
Minerals in

# ELECTRIC VEHICLES VS GAS CARS

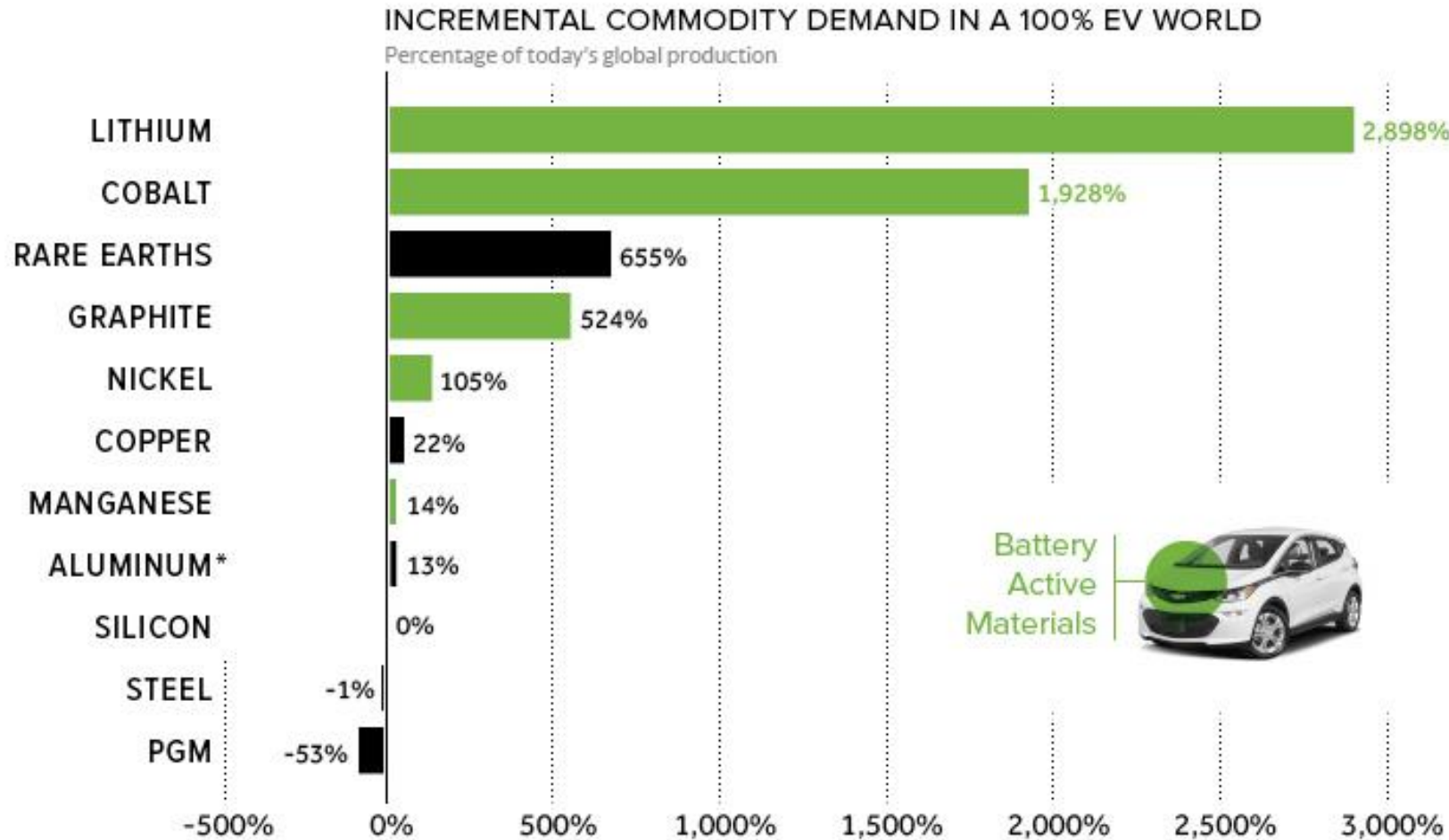
Mineral content kg/vehicle  
*Steel and aluminum not included.*

 Electric Vehicle  Gas Car

The engine in gas cars is heavier compared to EVs. A Civic's engine weighs around 184 kg while a Chevy Bolt's motor only weighs 76 kg.



# Proiezioni



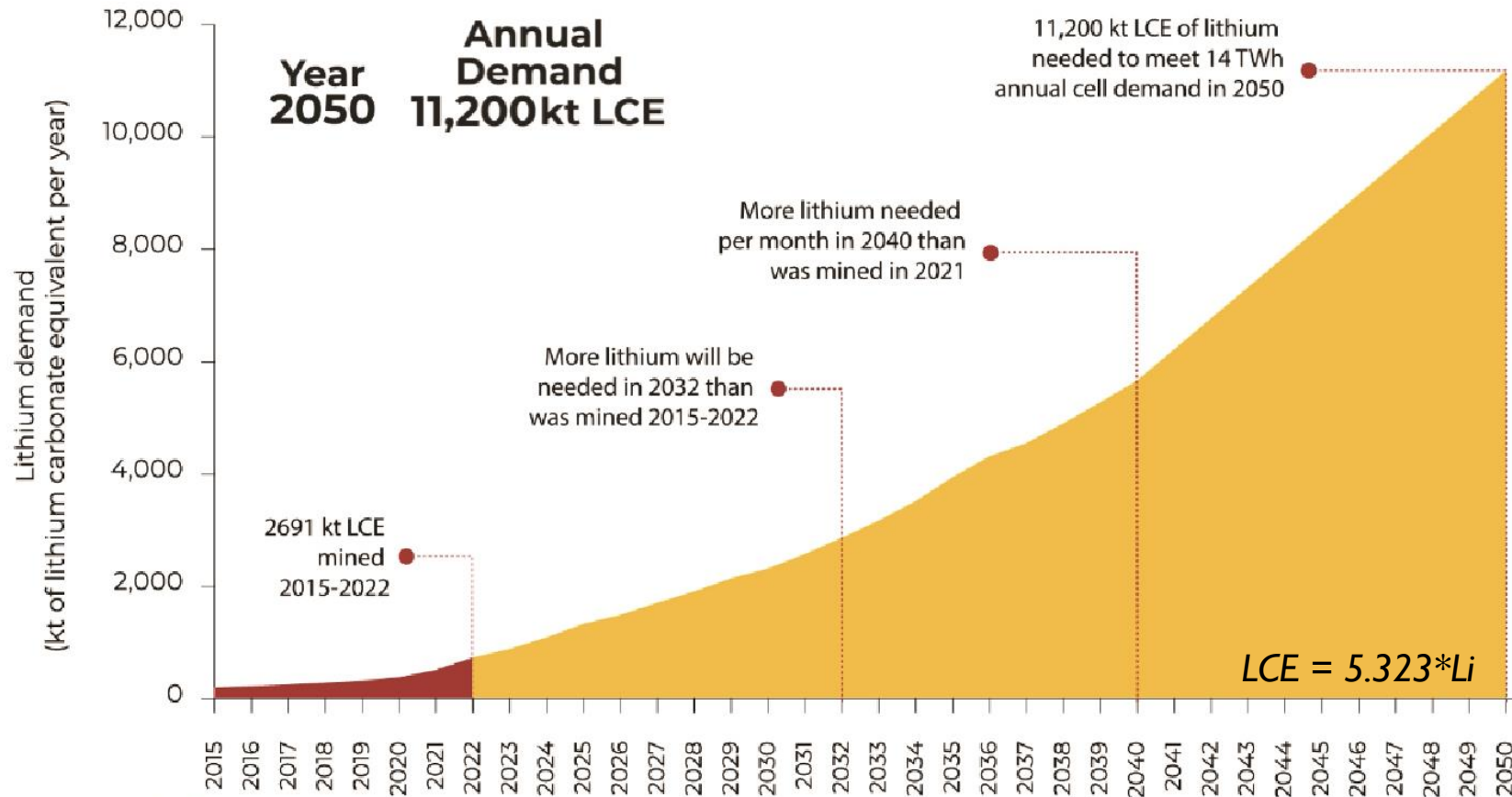
In un mondo dove il trasporto è al 100% elettrico avremmo bisogno di estrarre 30 volte più litio



# Proiezioni

## Lithium demand skyrockets to 2050

The scale of today's lithium mining dwarfs in comparison to what is needed in the coming decades as world needs 300 TWh of batteries by 2050.

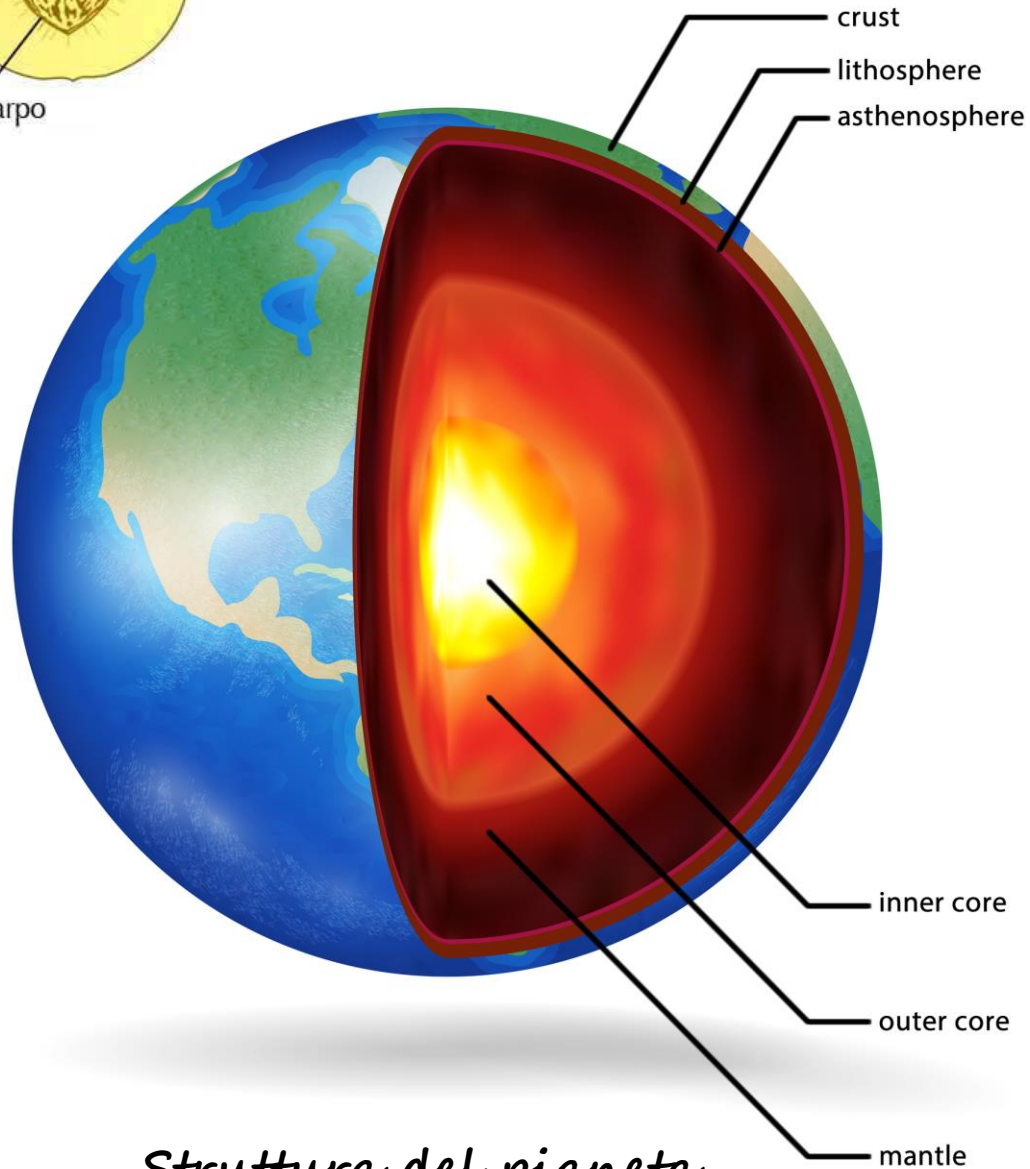
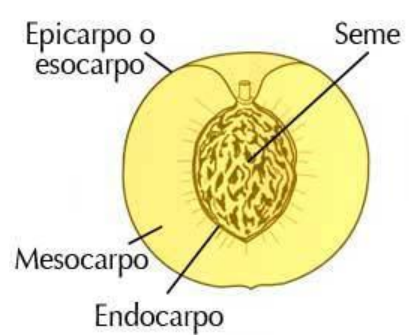


700 mila tonnellate (2022) vs. 11 milioni di tonnellate (2050)

Altre previsioni calcolano un aumento della domanda di litio per il 2050 del «solo» 500%. Sarà comunque una risorsa fondamentale

Il litio non è particolarmente scarso nella crosta terrestre, ma dobbiamo cercare quegli «ambienti» in cui i processi naturali lo hanno concentrato a sufficienza per essere sfruttato: **DOVE?**

# La Terra è una pesca



Struttura del pianeta

**Raggio terrestre = 6378 km**

La crosta terrestre ha spessore variabile (10-80 km) e rappresenta appena l'**1.4%** in volume del pianeta

**La crosta (continentale)** è arricchita in elementi «incompatibili» – composizione «particolare»

$$\text{ppm} = \mu\text{g/g} - 1\text{wt}\% = 10000 \text{ ppm}$$

| Reservoir (valori medi)  | Li (ppm) |
|--------------------------|----------|
| Acqua di mare            | 0.2      |
| Mantello                 | 1.6      |
| Crosta continentale      | 20       |
| Granito                  | 40       |
| Salar de Atacama (brine) | 1400     |
| Mt. Holland (pegmatite)  | 3400     |
| Thacker pass (hectorite) | 3280     |

**Dove e come si concentra il litio?**

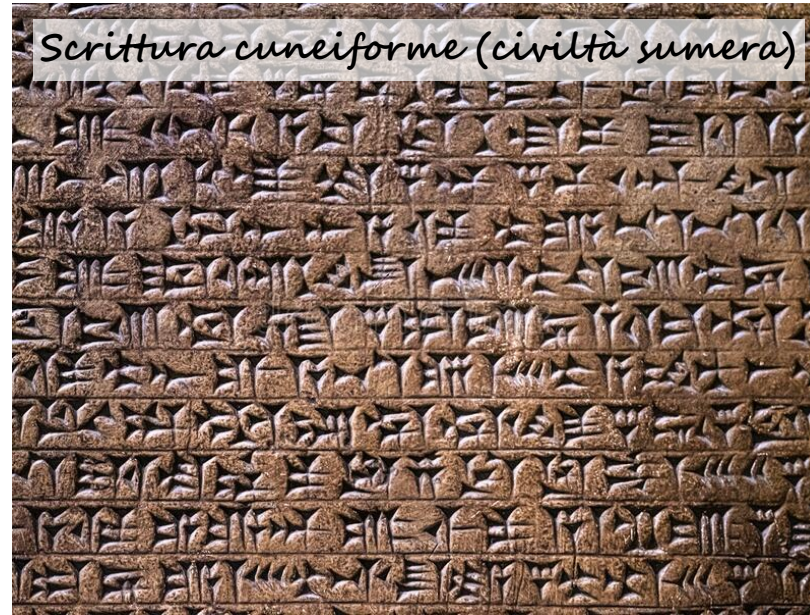
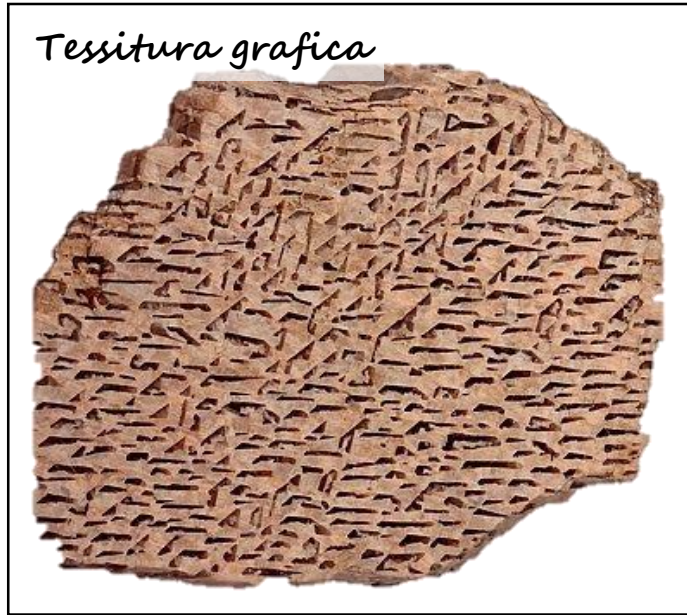
## Pegmatiti → Pegmatiti a Li-Cs-Ta (LCT)

Rocce magmatiche intrusive. Sono generalmente caratterizzate da tessitura a grana grossa (cristalli > 1 cm, fino a metrici), alta variabilità tessiturale interna e tessitura «grafica». Possono contenere minerali rari.

Formano corpi tabulari («filoni»), spesso di volumi limitati, ma con tenori in litio che possono essere molto elevati (3 – 0.3%  $\text{LiO}_2$ )

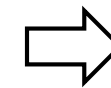


**Tessitura grafica** - intercrescita di feldspato alcalino e quarzo a formare un «motivo» che ricorda la scrittura cuneiforme

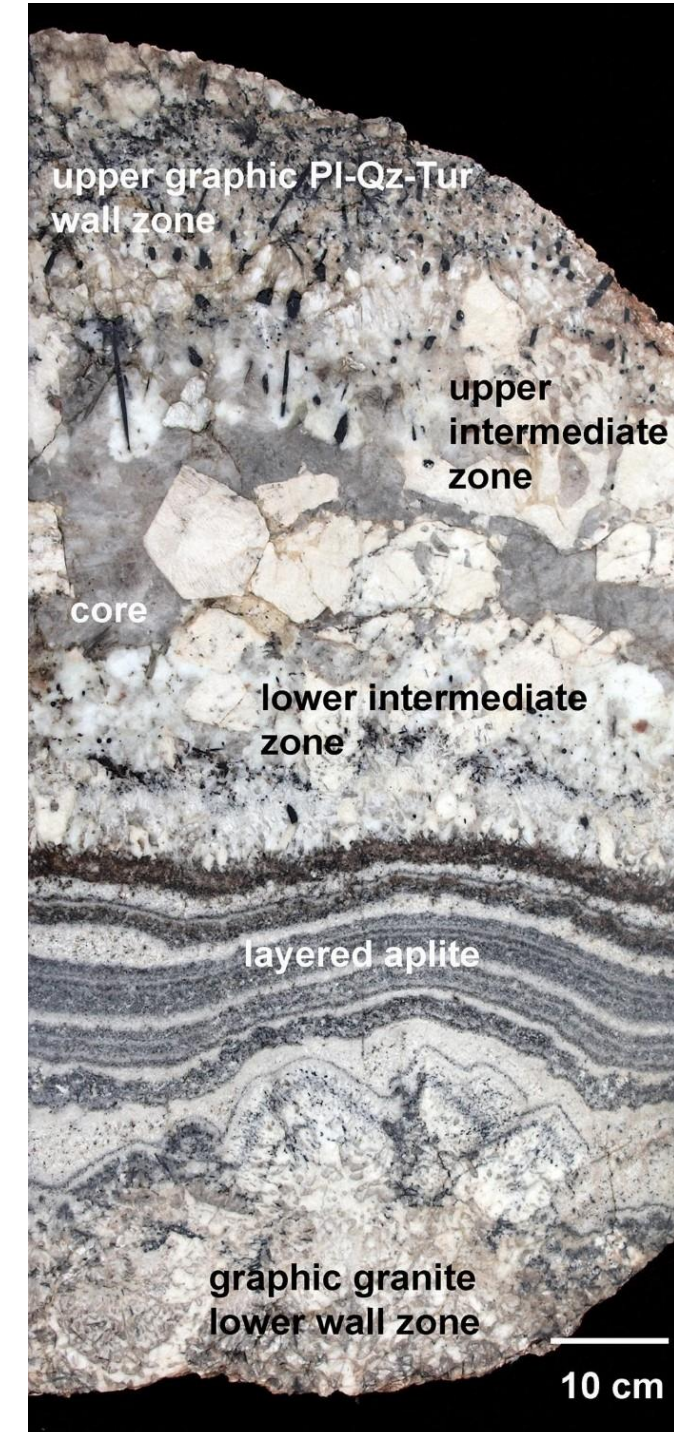


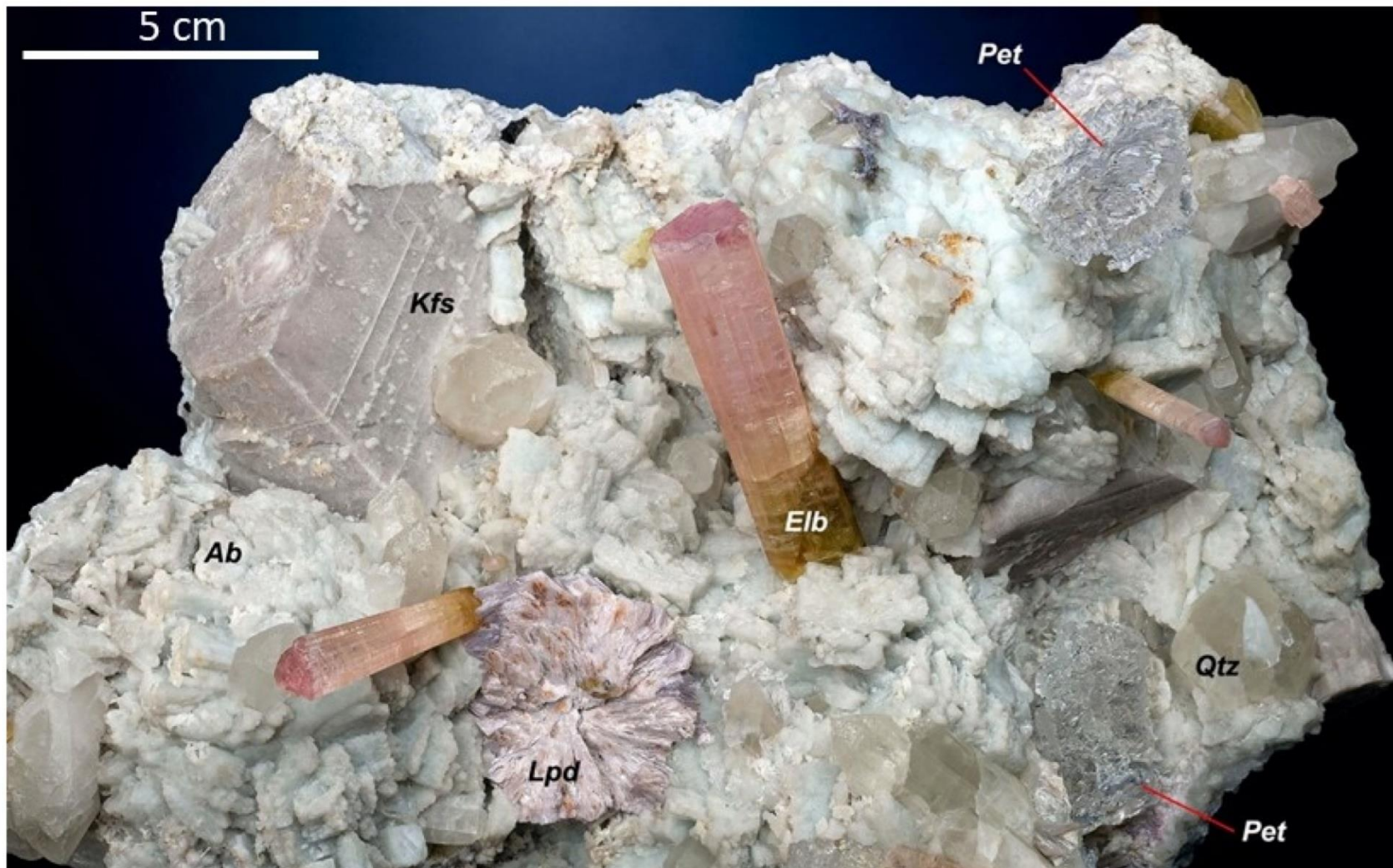
**Variabilità tessiturale  
interna in una pegmatite**

[foto da London et al., 2008]



Rocce molto complesse che si formano da magmi ricchi in fluidi – I meccanismi genetici sono ben studiati, ma poco chiari. Quando? Dove?  
Come si origina la variabilità interna?





Drusa dalle pegmatiti LCT dell'Isola dell'Elba. Tipica associazione di minerali di litio: **Elbaite (Elb)**, **Lepidolite (Lpd)** e **Petalite (Pet)**

Il cristallo di elbaite misura 6 cm [foto da Dini et al., 2022]

### Minerali di Litio

Spodumene  $LiAlSi_2O_6$

Elbaite  $Na(Al,Li)_3Al_6(Si_6O_{18})(BO_3)_3(OH)_4$

Amblygonite  $LiAlPO_4F$

Petalite  $LiAlSi_4O_{10}$

Lepidolite  $KLi_2AlSi_4O_{10}F_2$

**Non tutte le pegmatiti sono pegmatiti LCT e non tutte le LCT hanno valore economico!**

Il minerale «economico» principale per la produzione di Li per batterie è lo **spodumene** ( $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ) –  $\text{LiO}_2 = 8 \text{ wt\%}$   
La **petalite** ( $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ ) viene estratta per l'industria ceramica

### Svantaggi:

- Estrazione e lavorazione necessitano di molta energia
- Si producono grandi quantità di scarto



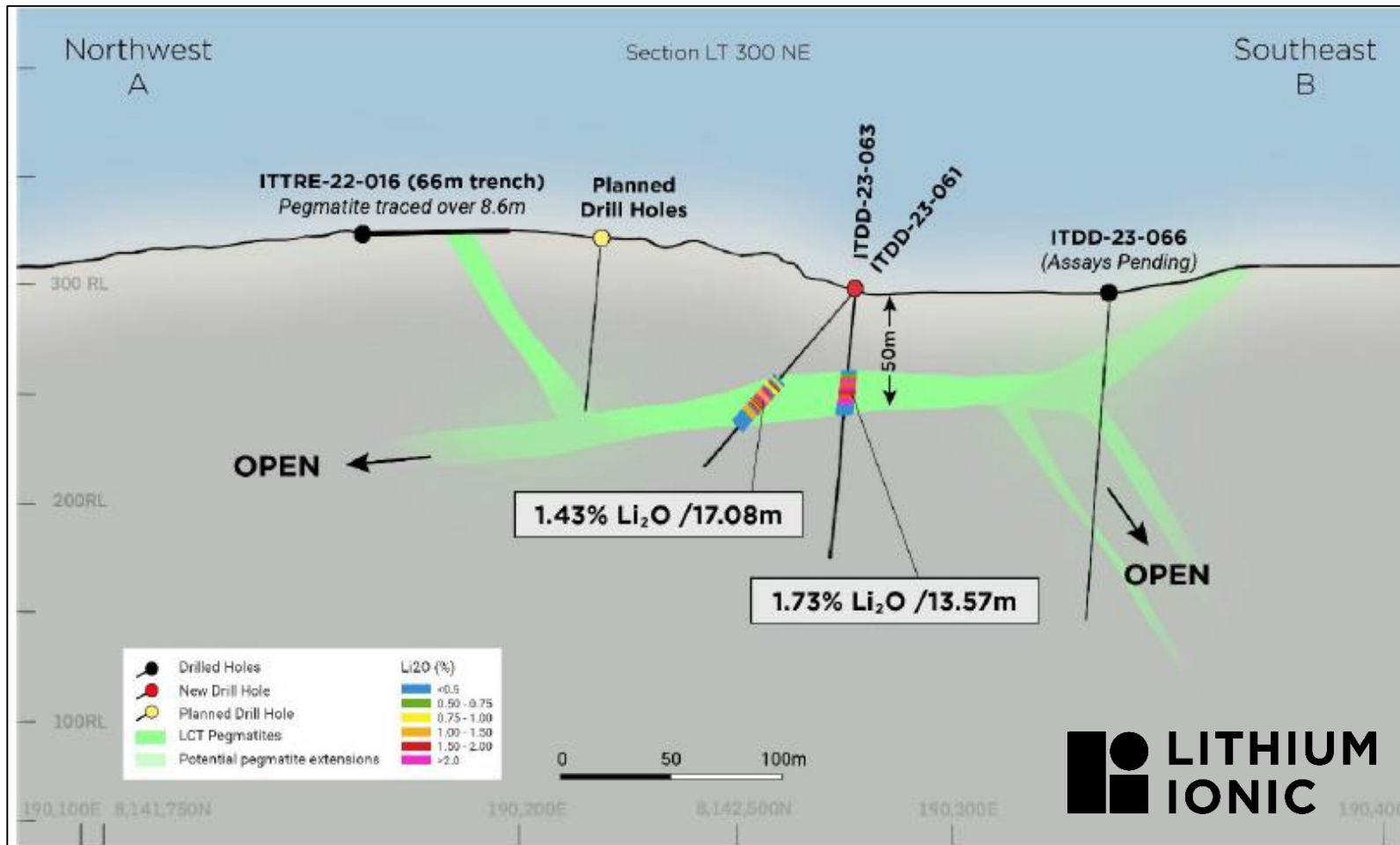
# Prospezioni

## Obiettivi:

Ricostruzione della geometria 3D dei corpi mineralizzati

Individuazione di parametri geologici guida → processi di formazione

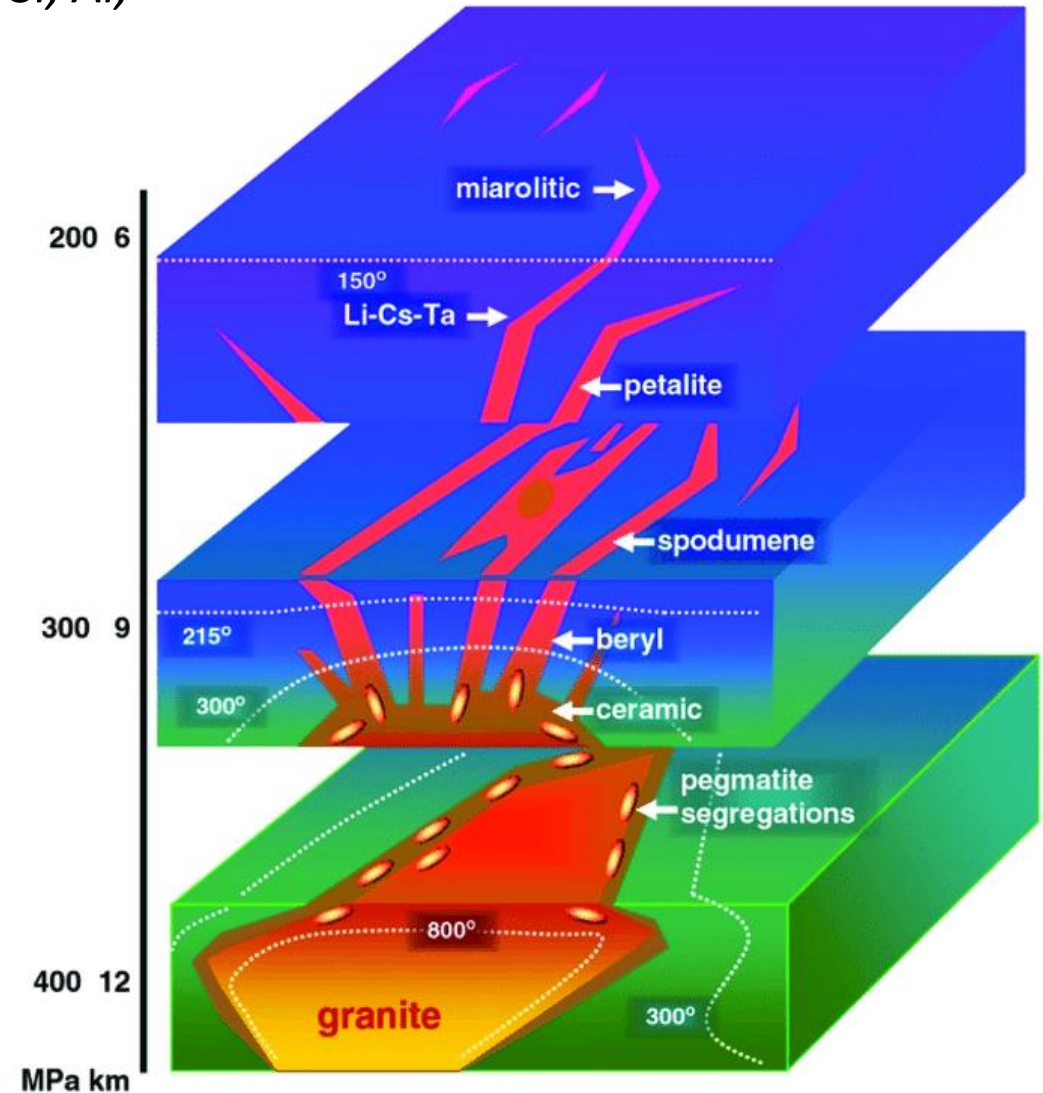
*Prospezioni per l'individuazione di target minerali in Minas Gerais (Brasile)*



# Come si formano?

## Modello «tradizionale»

- Risalita di un magma a composizione granitica (*silicatico* –Si, Al, Mg, Fe, Na, K, Ca, Ti...) attraverso la crosta continentale
- Il magma caldo si ritrova in un ambiente circostante più freddo ( $\Delta T$ )
- Cristallizzazione (si formano «minerali») – composizione minerali  $\neq$  composizione del fuso (*termodinamica*)
- Il fuso si arricchisce in elementi «incompatibili» (e.g. Li)
- Formazione di una fase fluida (vapore)
- Messa in posto di corpi pegmatitici a distanza dal granito sorgente –zonatura chimica





# Laghi salati (salar)

Formazione di salamoie (i.e. acque salate; «**brines**» in inglese) ricche in Li in bacini chiusi

## Ingredienti

- Rocce arricchite in Li (sorgente)
- Sistema idrotermale (interazione acqua-roccia)/ lisciviazione del Li
- Bacini secondari di accumulo di acque ricche in Li
- Clima arido: evaporazione >> precipitazione

Salamoie: % sali disciolti (cloruri, solfati...), > 3.5%, > 10%



*Salar de Rincon (Argentina)*

# Come si formano?

Le «brine» sono pompate in superficie in bacini artificiali per favorire l'evaporazione (climi aridi)

## Vantaggi:

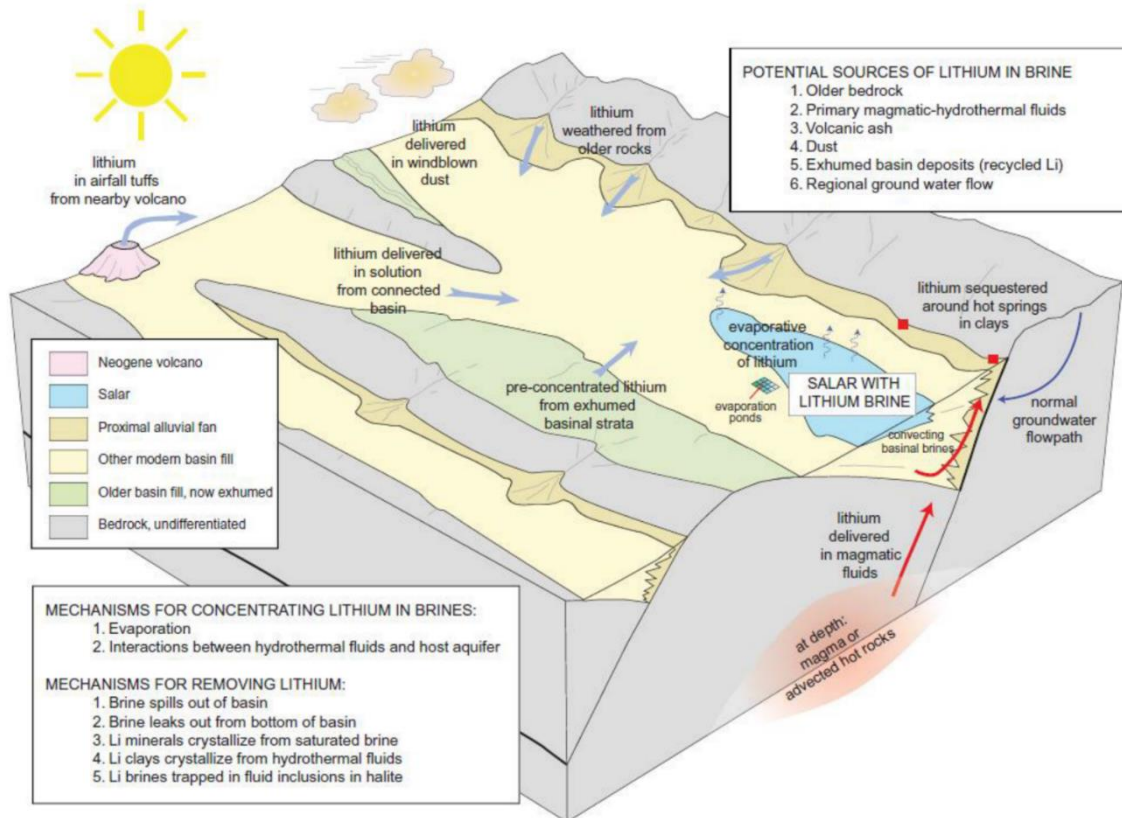
Tenori moderati (0.15 -0.05% LiO<sub>2</sub>)

Facili da esplorare ed estrarre

«Poca» energia richiesta

## Svantaggi:

- Processo lungo (evaporazione)
- Utilizzo di molta acqua (in regioni aride)
- Resistenza da comunità locali



# Minerali argillosi ricchi in litio

Tenori da moderati ad alti (1.8 -0.3%  $\text{LiO}_2$ )

Depositi in rocce sedimentarie associate a rocce vulcaniche acide (rioliti/ignimbriti)

Depositi principali:

- McDermitt caldera (California/Nevada)
- Clayton Valley (Nevada)
- Turchia occidentale
- Argentina settentrionale
- Sonora (Messico)
- Serbia (Jadarite\*)

**Svantaggi:**

- Estrazione e lavorazione necessitano di molta energia
- Si producono grandi quantità di scarto
- Resistenza da comunità locali



*Clayton Valley (Nevada, USA)*

# Come si formano?

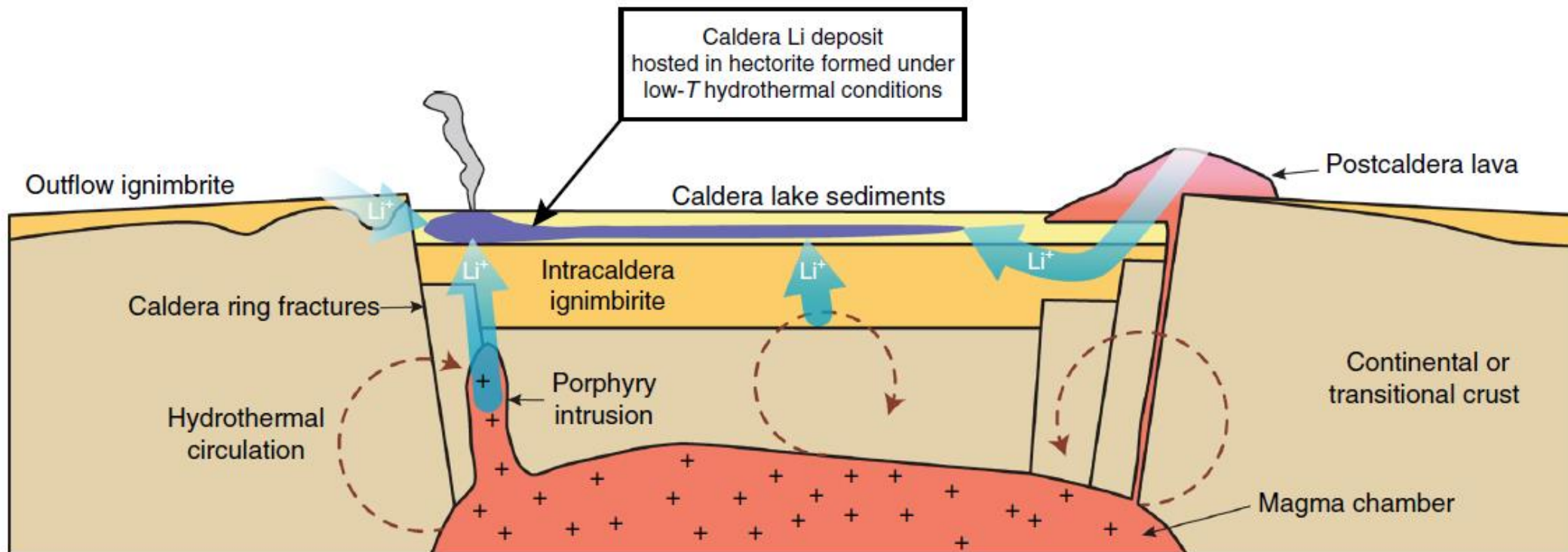
## Ingredienti:

- Grandi volumi di materiale eruttato a composizione «riolitica» (alti in Li)
- Sistema idrotermale (interazione acqua-roccia)/ lisciviazione del Li
- Sedimenti che interagiscono con acque arricchite in Li

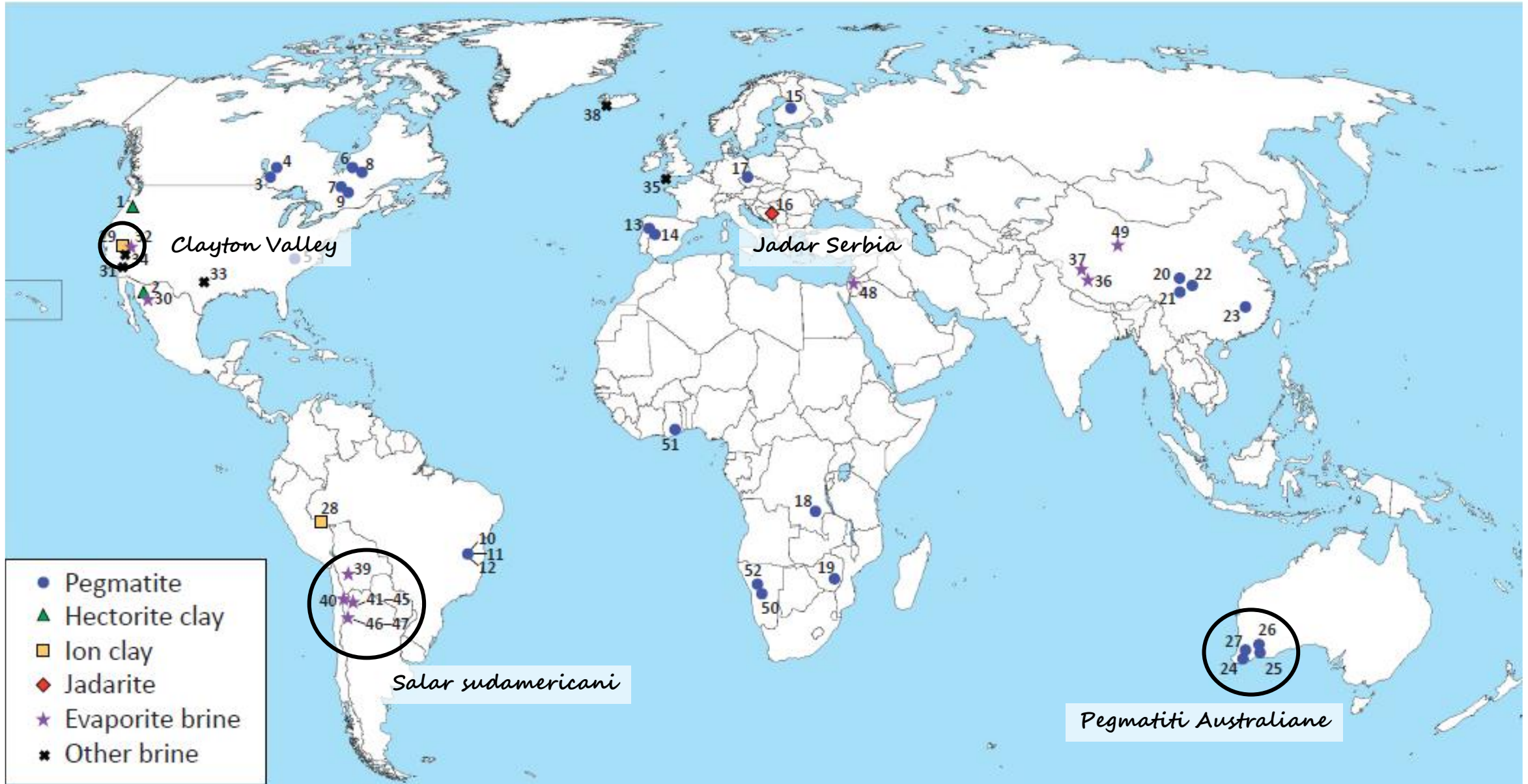


Formazioni di minerali argillosi ricchi in Li (e.g. Ettoreite)

[da Benson et al., 2017]

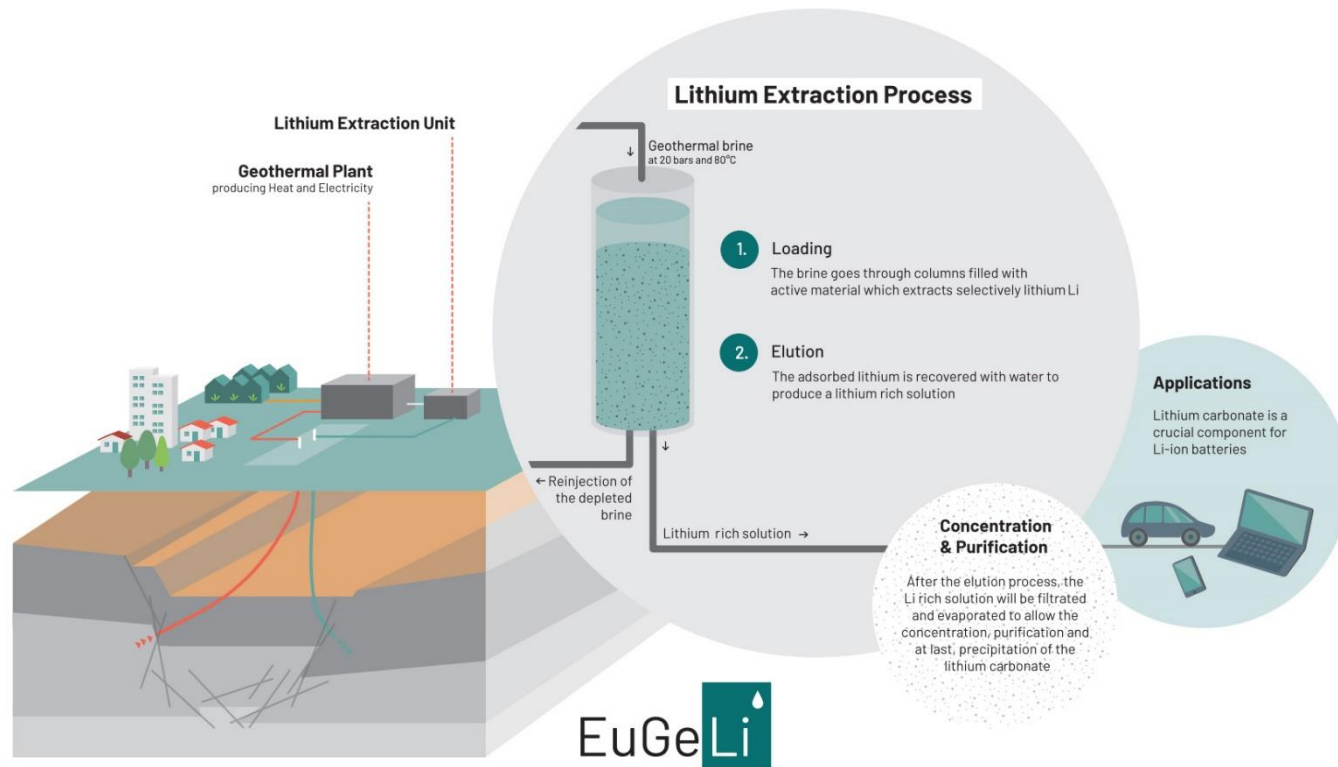


# I principali depositi nel mondo



# Depositi non-convenzionali di brine

**LITIO GEOTERMICO** - Estrazione di litio da acque/brine ricche in litio in pozzi geotermici



## Circuito chiuso –

1. l'acqua è pompata fuori dal sistema geotermico,
2. viene estratto il litio,
3. l'acqua è iniettata nuovamente nel sistema (tempi di ricarica?)

**zero-carbon lithium**

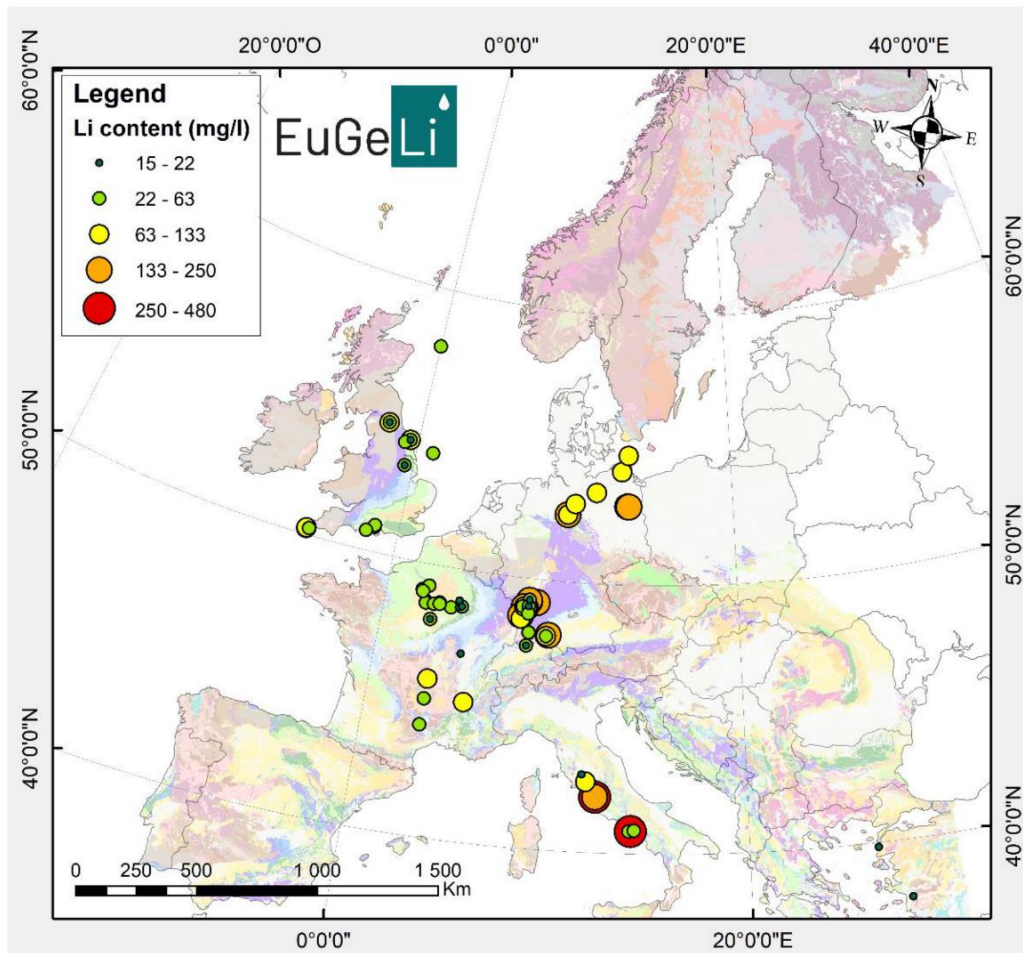


## Vantaggi:

- Varietà di ambienti geologici
- Co-produzione di calore e litio
- Basso consumo di energia
- Minima quantità di scarto/rifiuto

**Perché il litio si arricchisce nelle acque geotermiche?**

# Litio geotermico: una possibilità per l'Italia?



*Abbondanza in Li in brine geotermiche in EU*

Le pomici (rocce vulcaniche) possono contenere «alte» concentrazioni in litio

Formate da vetro vulcanico hanno alta porosità e possono rilasciare il litio nelle acque



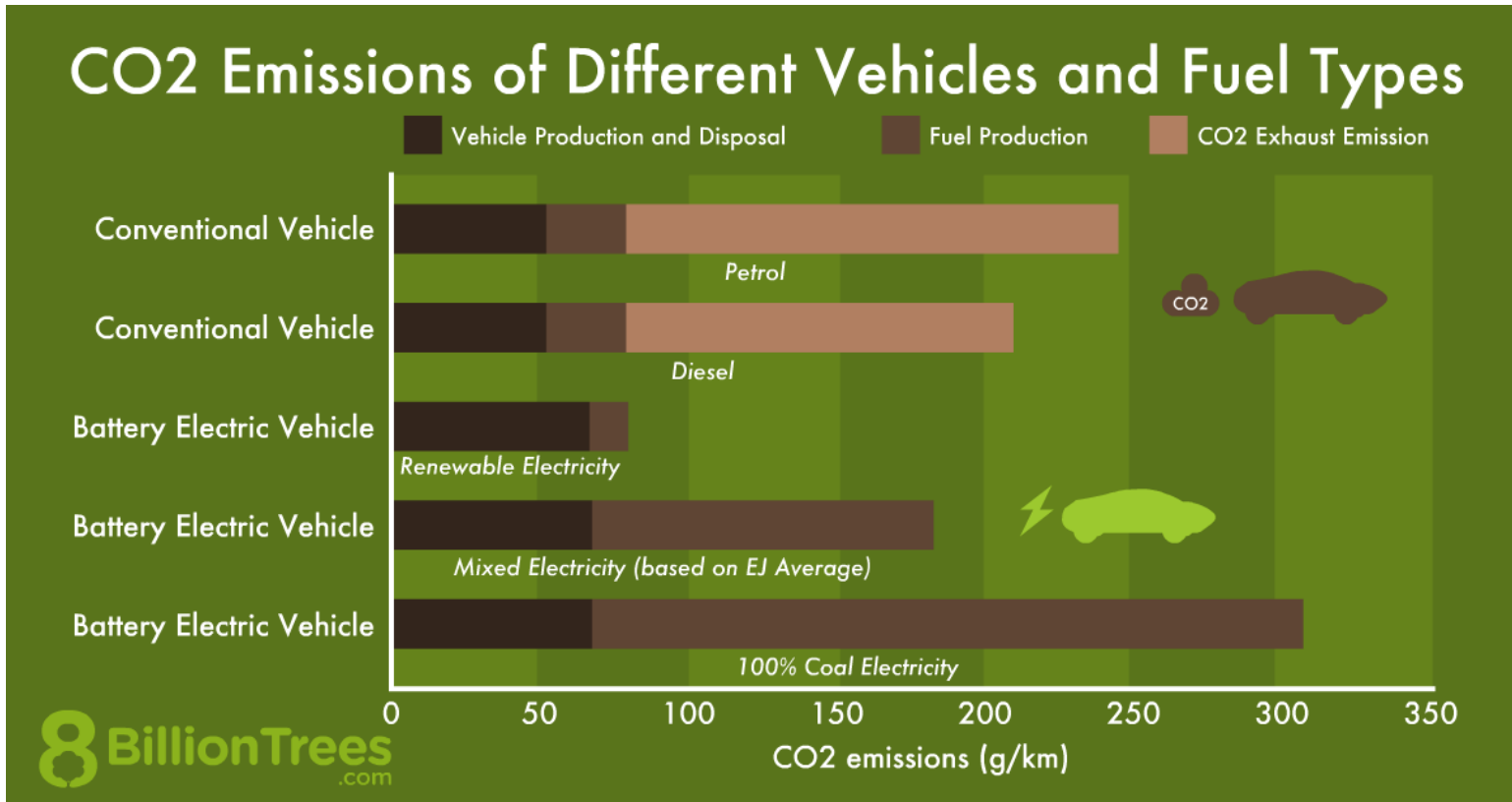
**Vulcan ha ottenuto un permesso esplorativo per il pozzo di Cesano (Lazio)**

## **Svantaggi:**

- Bassi tenori (0.1-0.02%  $\text{LiO}_2$ )
- La tecnologia di estrazione deve essere sviluppata
- Possibili contaminazioni (F, Br)

# Cavalli, macchine e macchine elettriche

Qual è l'emissione complessiva di un veicolo durante il suo ciclo vitale?



- Le macchine elettriche non sono una tecnologia a emissione ZERO
- Molto dipende da come produciamo l'energia per ricaricarle
- Migliorano la qualità dell'aria nelle grandi città e possono essere un fattore positivo per la limitazione della produzione di gas serra

**Invettiva contro per il proliferare dei monopattini elettrici!**



**GRAZIE**

**E BUON APERITIVO**

