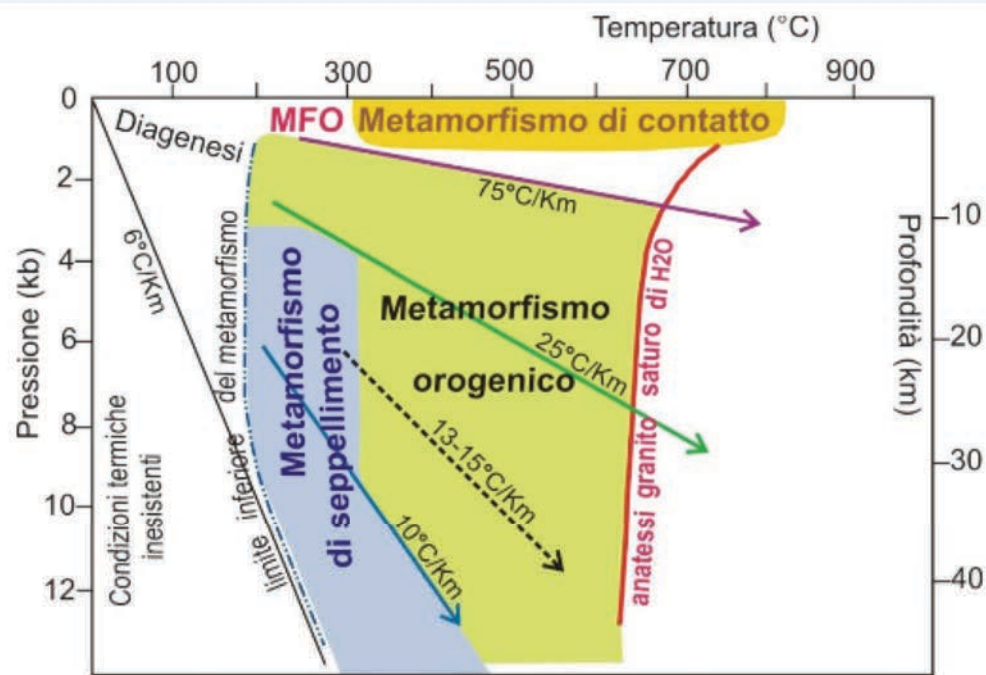
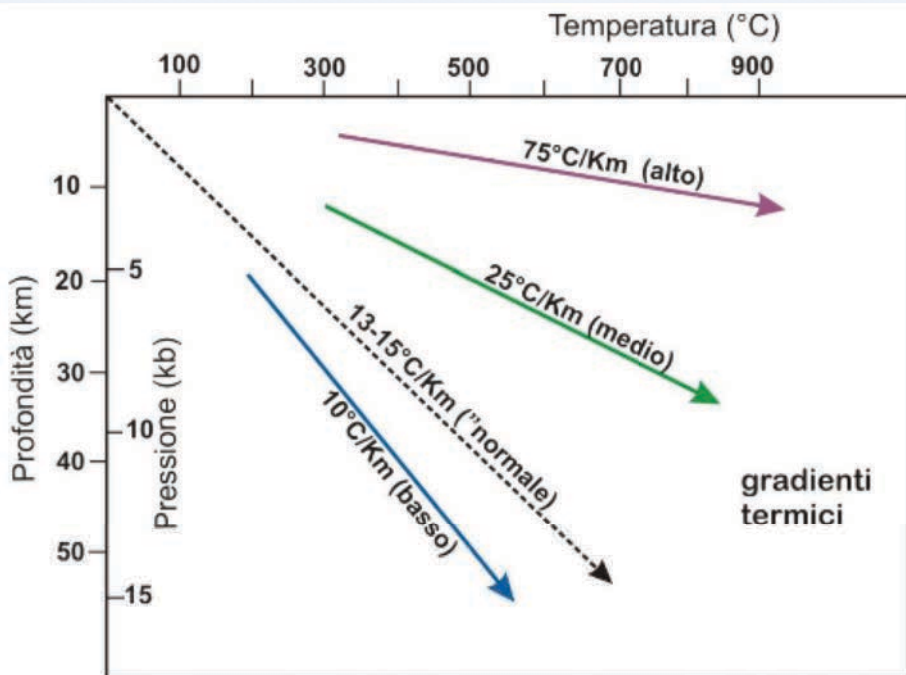


Gradualità dei processi metamorfici

Grado metamorfico →

Grado metamorfico →



Grado metamorfico: È un'indicazione generale sulla T durante il metamorfismo
Basso → Medio → Alto

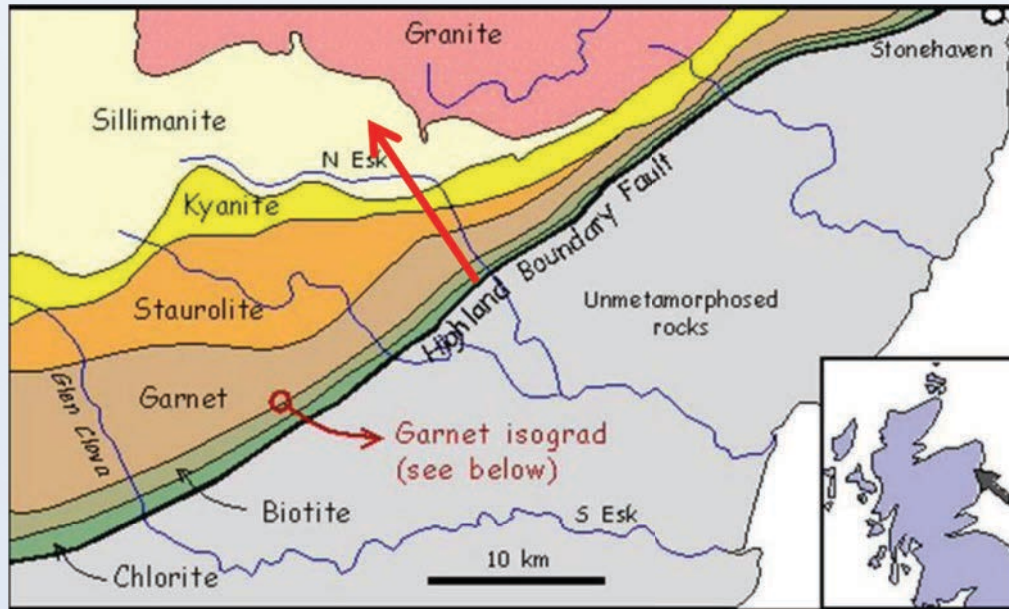
Gradiente termico: Relazione tra T e P (oppure profondità)
Basso → Medio → Alto

Ambienti geodinamici diversi (zone di collisione, subduzione, estensione) sono caratterizzati da gradienti termici diversi.

Quindi la T non varia in modo costante con la profondità !!

Zoneografia metamorfica

Studiando dei terreni metapelitici delle *Scotland Highlands* (orogenesi Caldoniana; ~ 500 Ma), il geologo George Barrow (1883) osservò che l'area presentava una zoneografia costituita da una sequenza specifica di minerali. Questa poteva cioè essere suddivisa in zone metamorfiche, ognuna definita dalla comparsa di un diverso minerale all'aumentare del grado metamorfico.



Tilley (1925)

Esempio (zona a):

Chlorite → Biotite → Granato → Staurolite → Kyanite → Sillimanite



I minerali che caratterizzano tali zone sono detti **minerali indice**.

La loro prima comparsa lungo la sequenza definisce la **zona metamorfica** (possono però persistere anche nelle zone successive).

La comparsa del minerale indice è funzione del grado metamorfico.

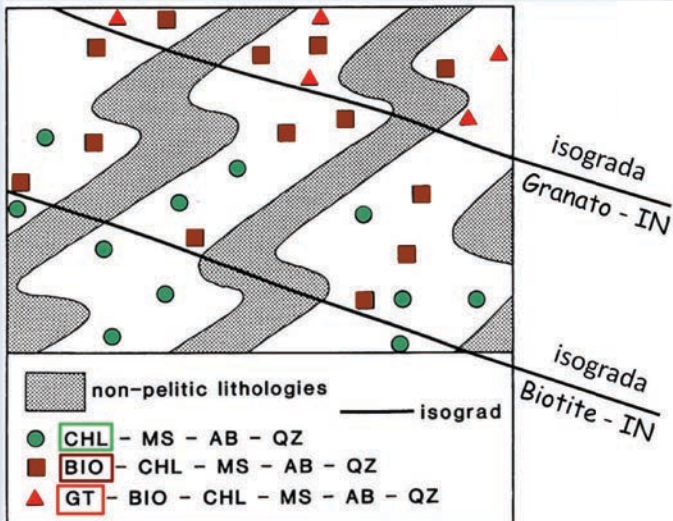
Zoneografia metamorfica

Zone Barroviane: zone di grado metamorfico crescente nel contesto di protoliti pelitici e metamorfismo regionale (gradienti termici 15–40 °C/km)

Esempio di sequenza tipica:

Zone	Typical assemblage	rocce pelitiche
Chlorite	1 <u>Chlorite</u> + phengitic muscovite + quartz + albite ± calcite ± stilpnomelane ± paragonite	argilloscisti/filladi
Biotite	2 <u>Biotite</u> + chlorite + phengitic muscovite + quartz + albite ± calcite	filladi-scisti
Garnet	3 <u>Garnet</u> + biotite + chlorite + muscovite + quartz + albite + epidote (chloritoid is very rarely present in this region, but is common at comparable grades elsewhere)	scisti
Staurolite	4 <u>Staurolite</u> + garnet + biotite + muscovite + quartz + plagioclase (possibly chlorite at low grades)	scisti
Kyanite	5 <u>Kyanite</u> ± staurolite + garnet + biotite + muscovite + quartz + plagioclase	scisti
Sillimanite	6 <u>Sillimanite</u> ± staurolite + garnet + biotite + muscovite + quartz + plagioclase ± kyanite relics	scisti/gneiss

Temperature crescente ↓ (left side)
grana crescente ↓ (right side)



NB: Ricordarsi che la stabilità dei minerali dipende non solo da P e T, ma anche dalla composizione della roccia.

Questo è un limite generale del concetto di minerale indice

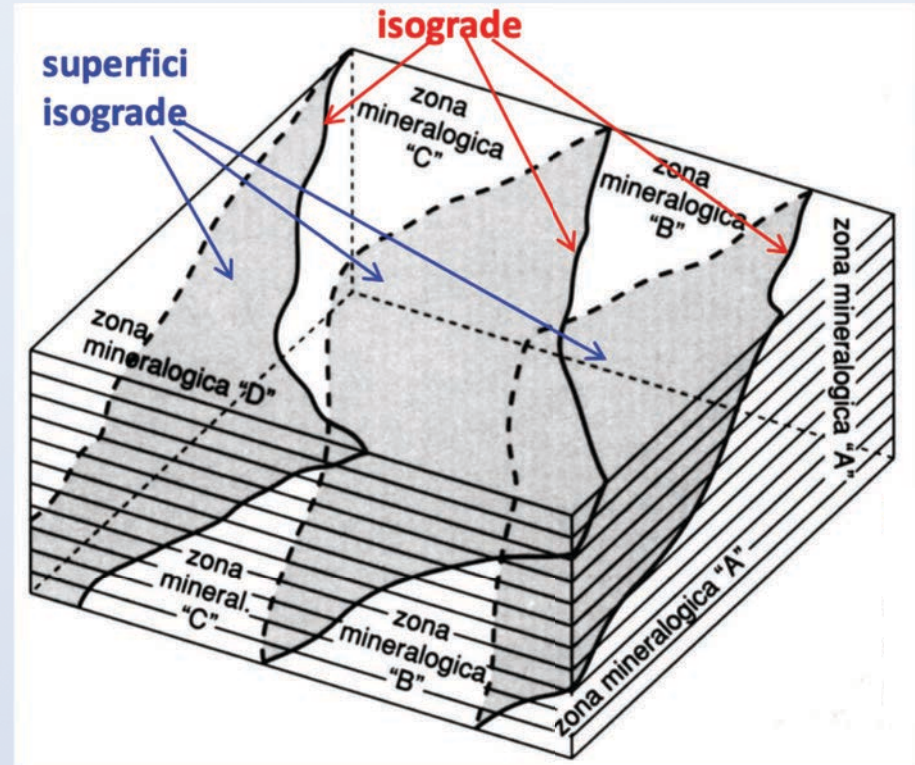
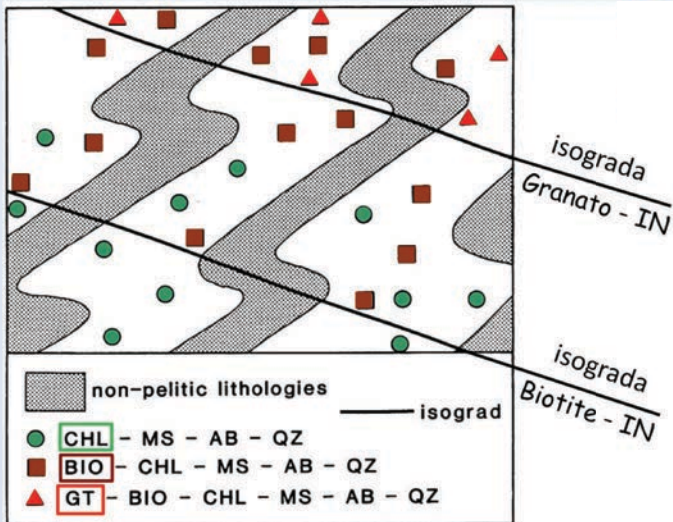
Zoneografia metamorfica

Rocce dello stesso grado metamorfico e di uguale composizione chimica (stesso protolite), avranno un uguale paragenesi mineralogica. Sul terreno, queste costituiscono una zona mineralogica cartografabile.

La successione di zone mineralogiche riconosciute in compagna definisce la zoneografia metamorfica del terreno esaminato.

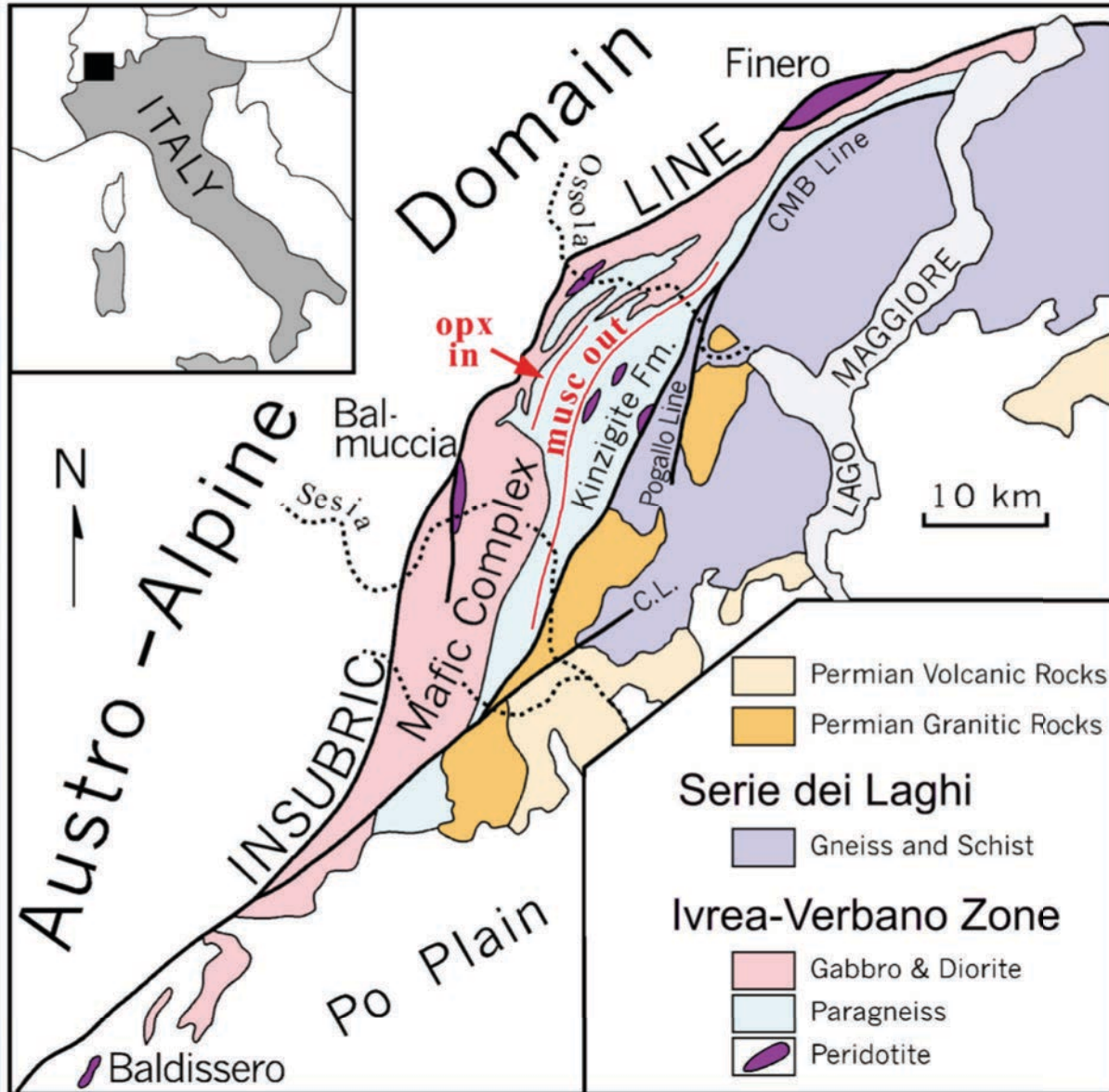
Due zone metamorfiche adiacenti, aventi grado metamorfico diverso, sono separate da un **isograda**.

Un **isograda** è il luogo dei punti (una superficie) di uguale grado metamorfico che definisce la comparsa/scomparsa di un minerale o di una associazione mineralogica, come risultato di una specifica reazione.



Zoneografia metamorfica

Esempi di isograde:



Carta geologica semplificata del Sudalpino occidentale (Zingg, 1983, modificato)

La zona di Ivrea-Verbanò contiene peridotiti, paragneiss, granuliti mafiche e rocce magmatiche intrusive.

La zona della Serie dei Laghi contiene gneiss e scisti, graniti e vulcaniti.

CMB: Cossato-Mergozzo-Brissago
CL: Cremosina Line

Isograde indicate in rosso:
Muscovite-out (musc-out)
Orthopyroxene-in (opx-in)

Zoneografia metamorfica

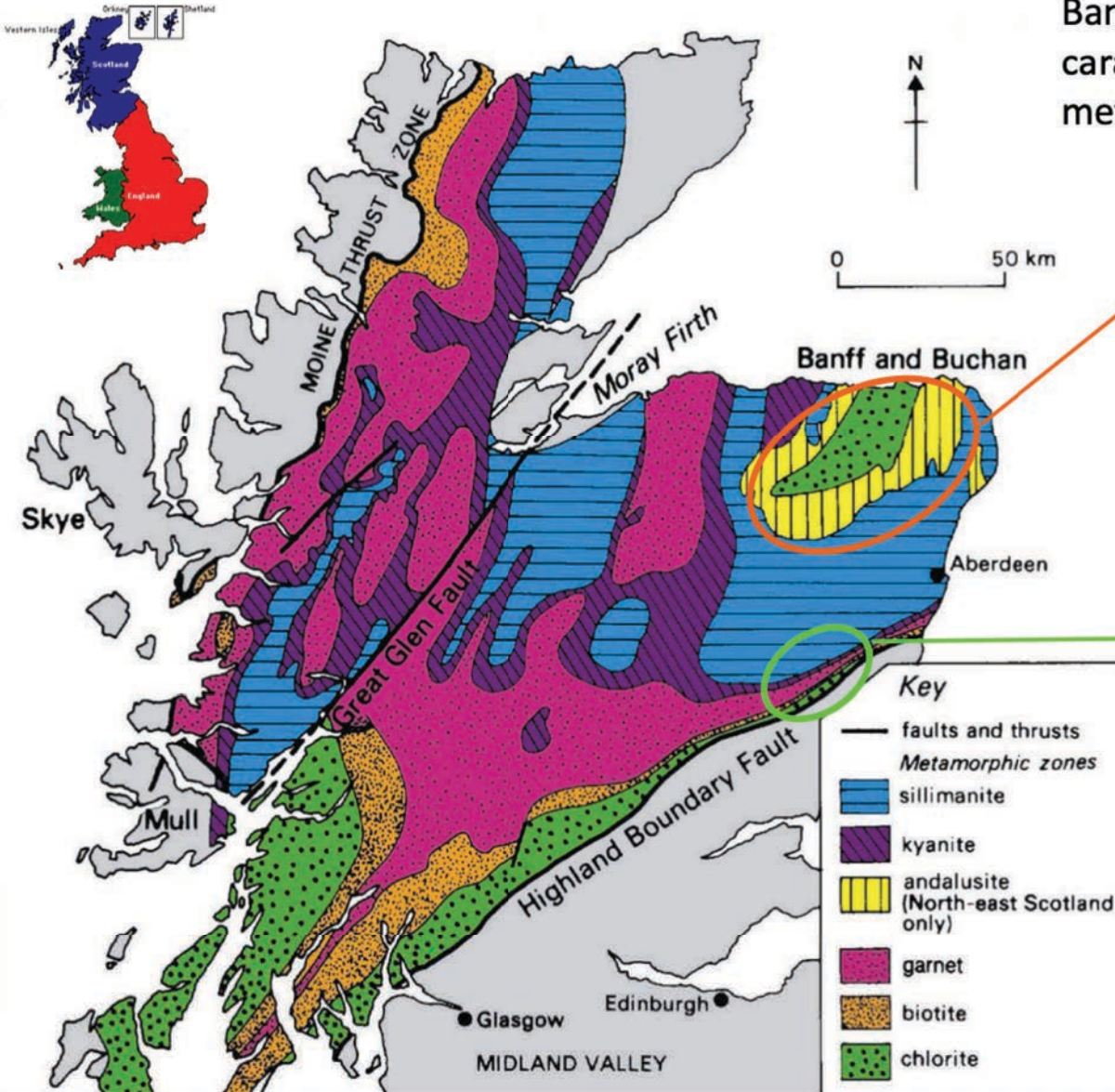
a nord dell'area di Barrow, nel distretto di Banff e **Buchan**, i terreni metapelitici sono caratterizzati, per incremento di grado metamorfico, da zone mineralogiche a :

BUCHAN

- Clorite
- Biotite
- **Cordierite**
- **Andalusite**
- **Sillimanite**

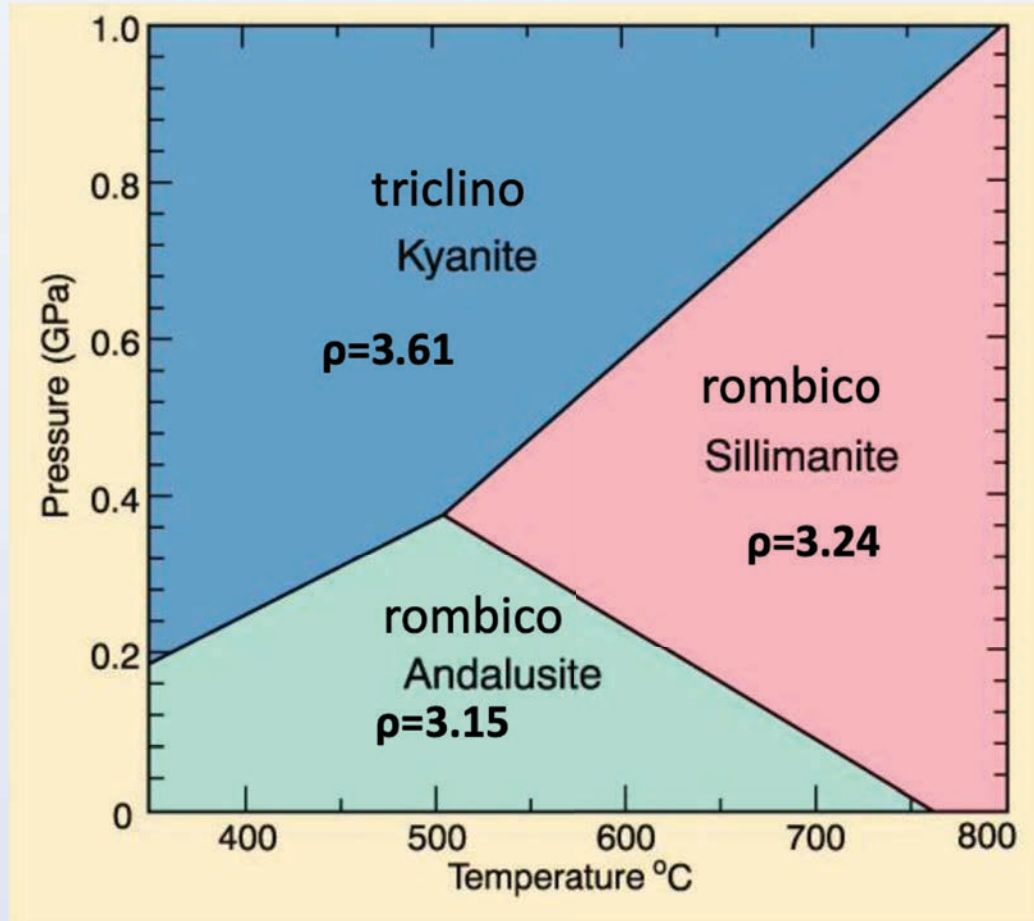
BARROW

- Clorite
- Biotite
- **Granato**
- **Staurolite**
- **Cianite**
- **Sillimanite**



Polimorfi Al_2SiO_5

Sono nesosilicati molto importanti nelle rocce metamorfiche ricche in Al (tipicamente metapeliti)



Punto triplo secondo Holdaway (1971)

Vengono utilizzati, in combinazione con altri minerali, per determinare le Facies metamorfiche (vedi slide successive)

CIANITE

(bassa-alta T / alta-altissima P)

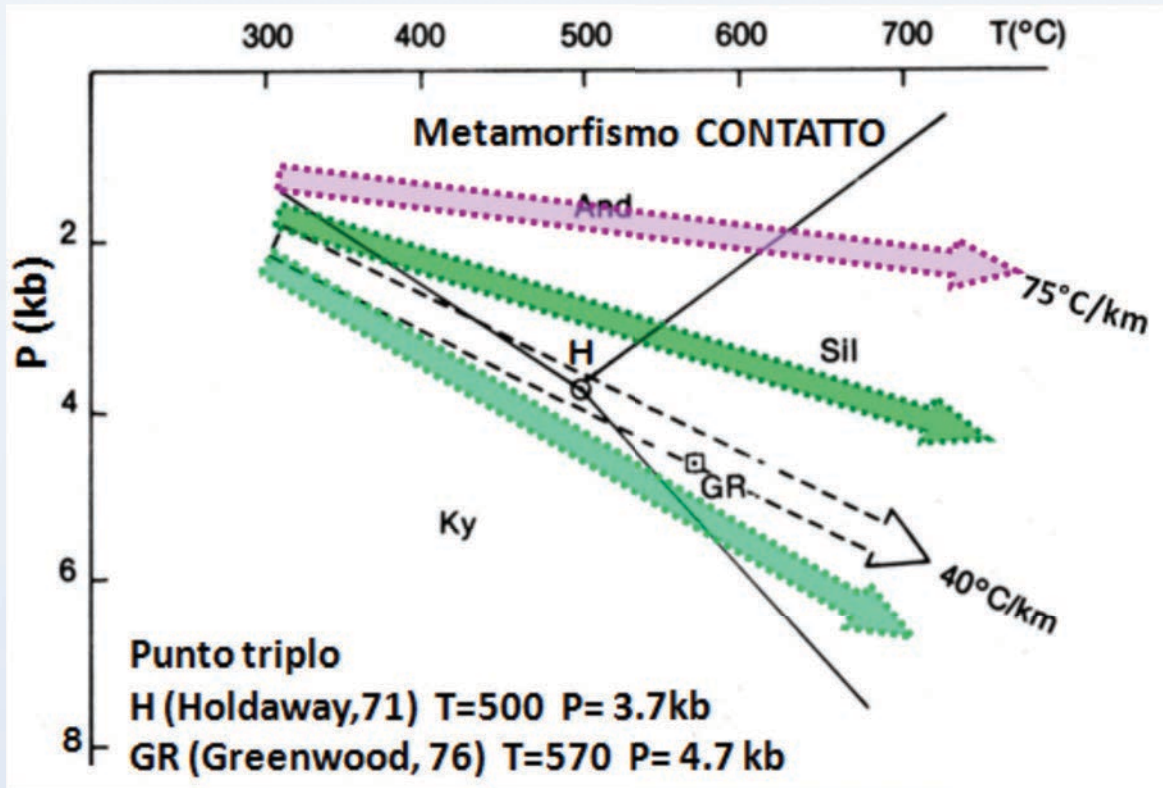
ANDALUSITE

(medio-alta T / bassa-bassissima P)

SILLIMANITE

(alta T / P variabile)

Polimorfi Al_2SiO_5



Sequenza di comparsa dei polimorfi Al_2SiO_5 per T crescente in relazione ai gradienti termici:

Gradiente termico alto:
cianite → sillimanite

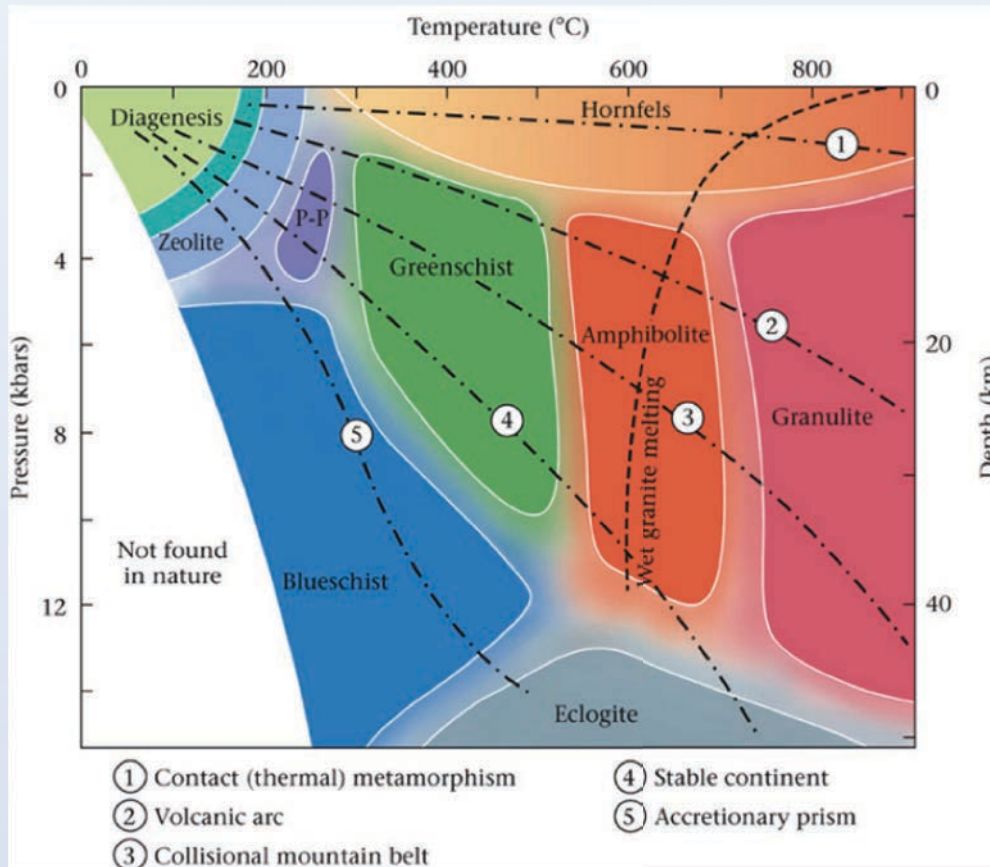
Gradiente termico medio-basso:
andalusite → sillimanite

Polimorfo	Andalusite	Sillimanite	Cianite
Tipo di metamorfismo	# contatto # regionale, di alto gradiente termico	# contatto # regionale, di medio-alto gradiente termico	# regionale, di basso-medio gradiente termico

FACIES METAMORFICHE

“Una facies metamorfica è un insieme di associazioni mineralogiche associate nello spazio e nel tempo. Esiste perciò una costante e prevedibile relazione fra composizione chimica della roccia e la sua mineralogia, a date condizioni ambientali (T-P)” (Verhoogen et al., 1970)

Una facies metamorfica è un insieme di associazioni mineralogiche controllate dalla composizione del protolite e collegate ad uno specifico campo P-T.

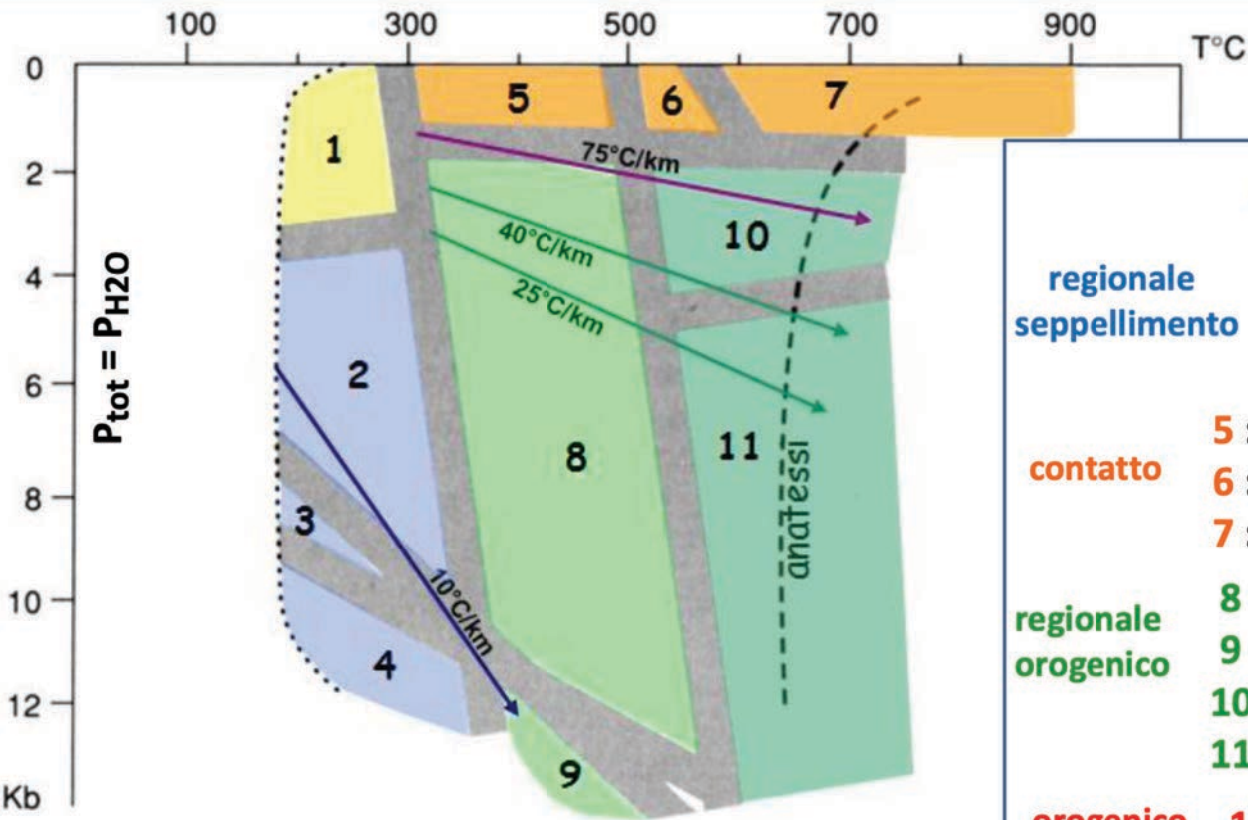


Eskola (1920) propose 5 facies, basate sui suoi studi di metamorfiti di derivazione basica (metabasiti). Questo spiega il nome che diede alle facie (es: facies degli SCISTI VERDI, facies delle ANFIBOLITI).

Alle 5 facies di Eskola (1920,1939) ne sono state aggiunte altre



FACIES METAMORFICHE



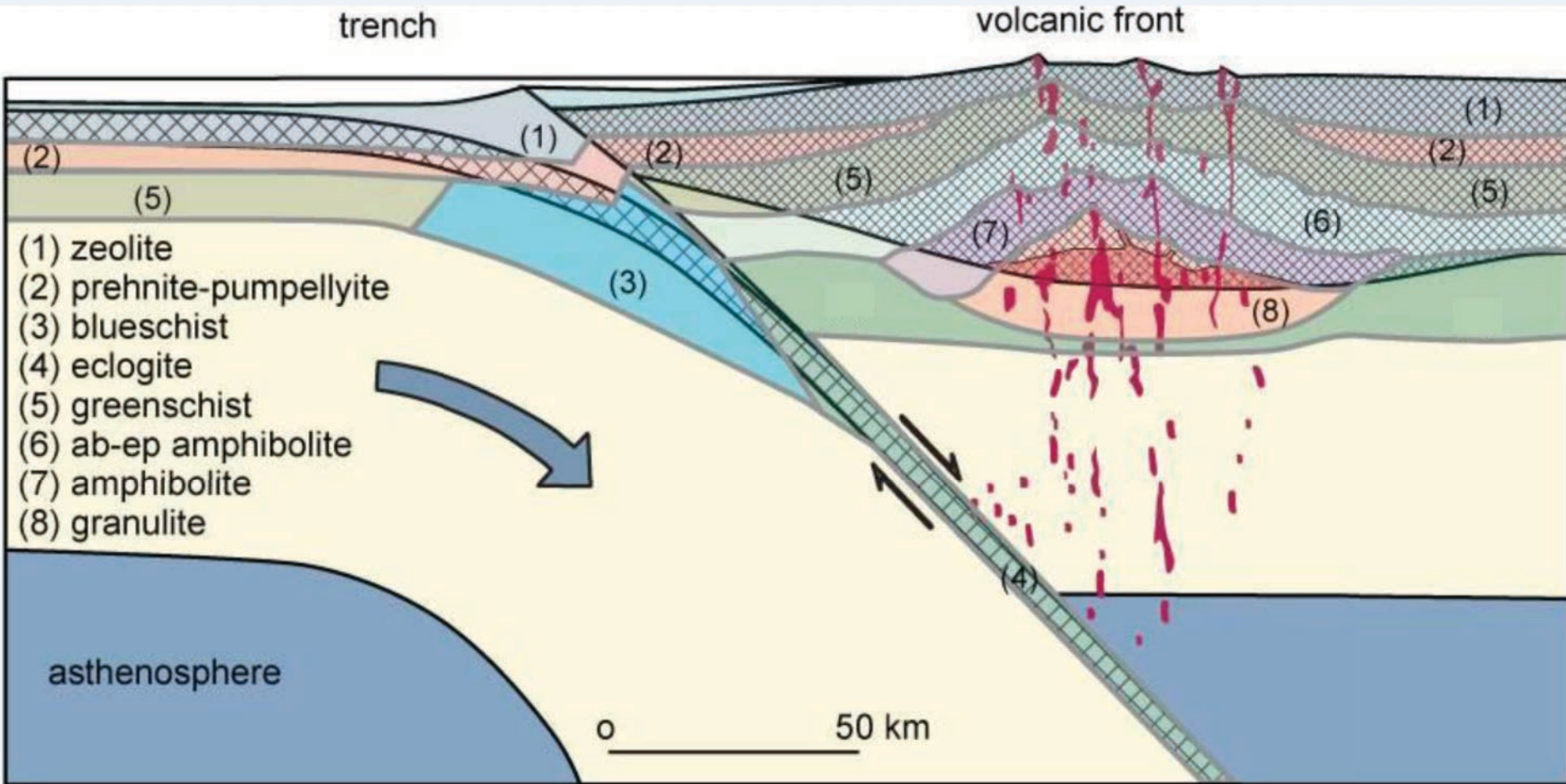
da Innocenti, Sassi, D'Amico (1987)

- | | |
|--------------------------------|--|
| | 1 : f. zeoliti |
| regionale seppellimento | 2 : f. lawsonite – albite |
| | 3 : f. lawsonite – giadeite + quarzo |
| | 4 : f. lawsonite – glaucofane |
| contatto | 5 : f. cornubianiti ad albite + epidoto |
| | 6 : f. cornubianiti ad horneblenda |
| | 7 : f. cornubianiti a cordierite + K-feld |
| regionale orogenico | 8 : f. SCISTI VERDI |
| | 9 : f. SCISTI VERDI a glaucofane (AP) |
| | 10 : f. ANFIBOLITICA a cordierite |
| | 11 : f. ANFIBOLITICA ad almandino |
| orogenico | 12 : f. GRANULITICA |
| subduzione | 13 : f. ECLOGITICA |

Facies : 1-11 $P_{tot} = P_{H_2O}$

Facies : granulitica + eclogitica $P_{tot} \gg P_{H_2O} \approx 0$

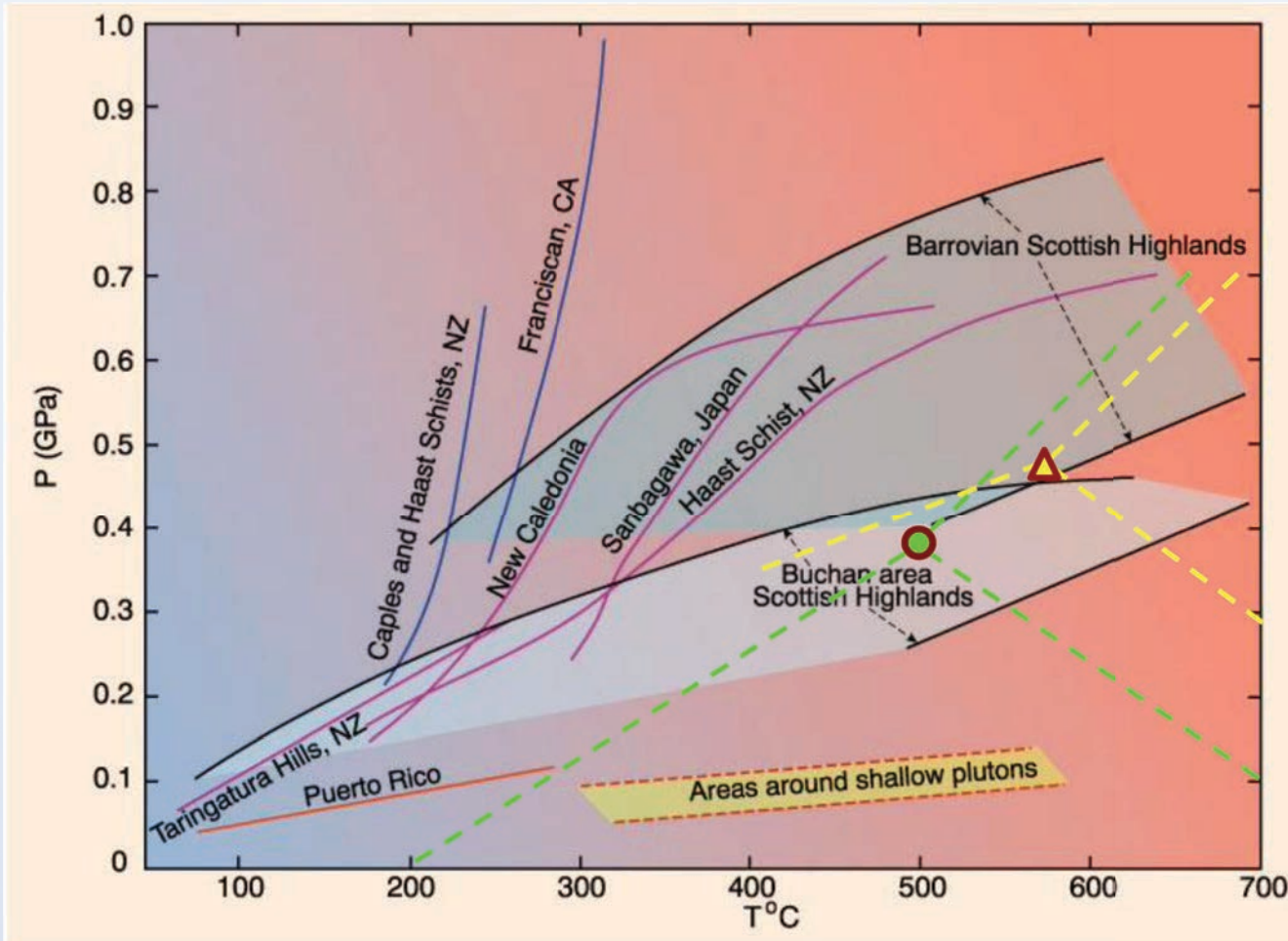
FACIES – Contesto geodinamico



Inquadramento schematico delle facies nell'ambito della tettonica a placche per zone di convergenza litosferica (Winter, 2010)

Serie di facies metamorfiche

Miyashiro (1961,1973) per primo evidenziò la presenza di serie di facies differenti in funzione del contesto geotettonico, definite da diverse traiettorie P-T. Proponeva 5 serie



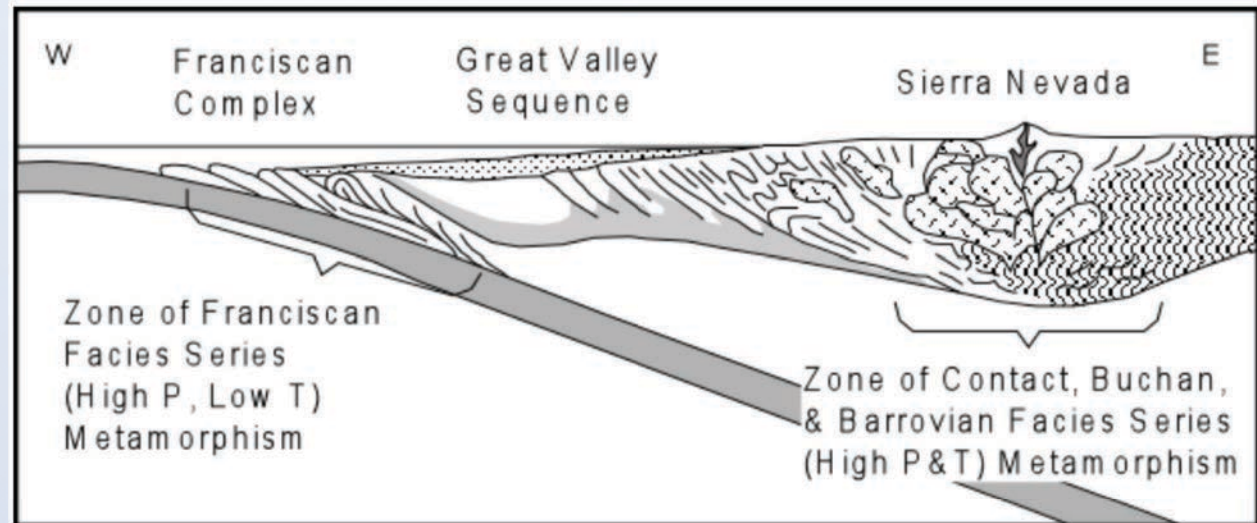
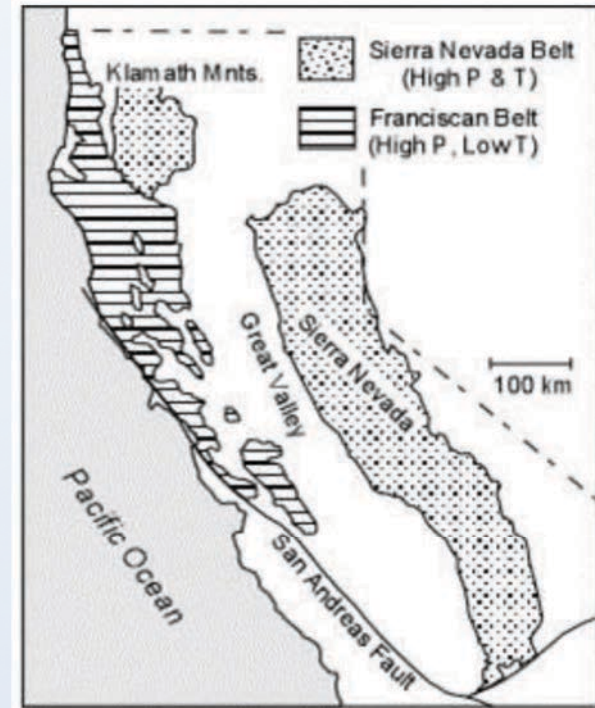
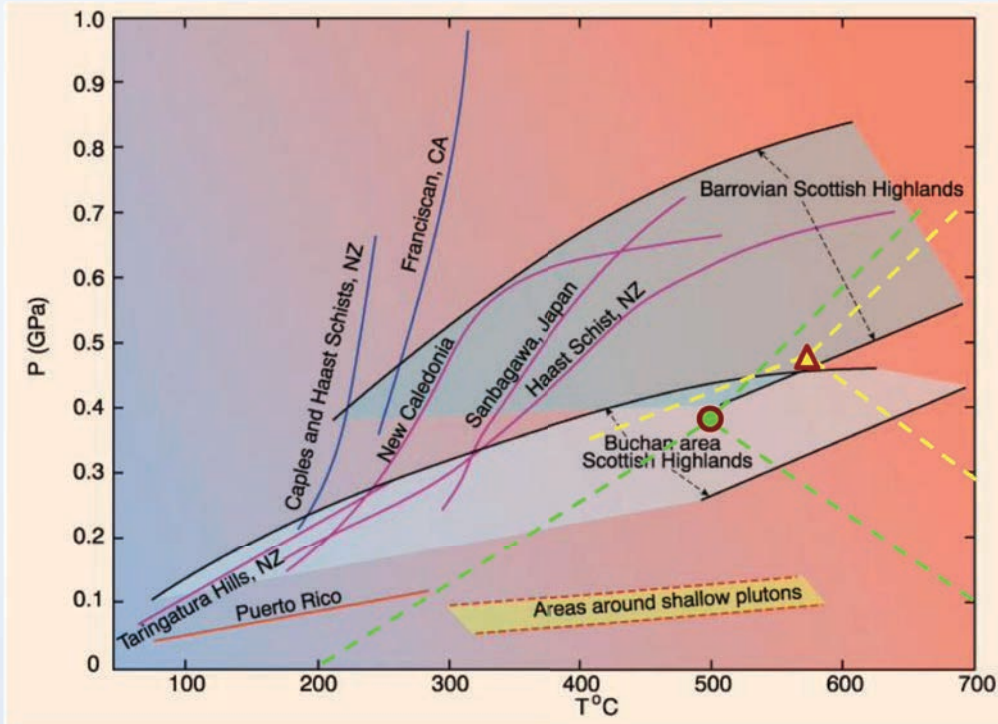
- Contact Series (bassissima P)
- Buchan or Abukuma Series (bassa P)
- Barrovian Series (media P)
- Sanbagawa Series (alta P, bassa-media T)
- Franciscan Series (alta P, bassa T)

La figura a fianco riporta le serie di Miyashiro, in aggiunta ad altre.

● Al_2SiO_5 : punto triplo ($T= 500^\circ\text{C}$, $P= 3.76 \text{ Kb}$; Holdaway, 1971)

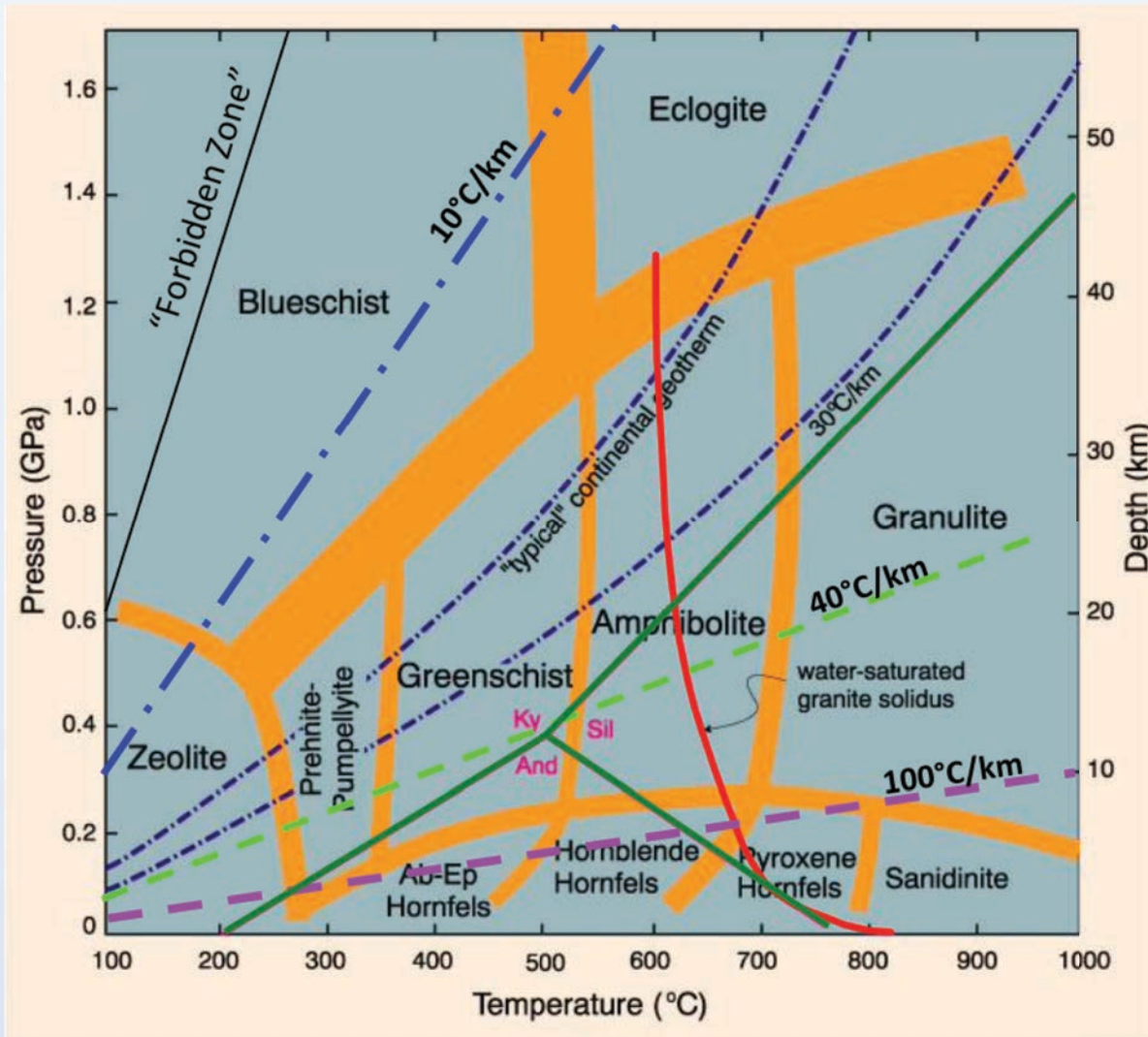
▲ Al_2SiO_5 : punto triplo ($T= 570^\circ\text{C}$, $P= 4.7 \text{ Kb}$; Greenwood, 1976)

Serie di facies metamorfiche



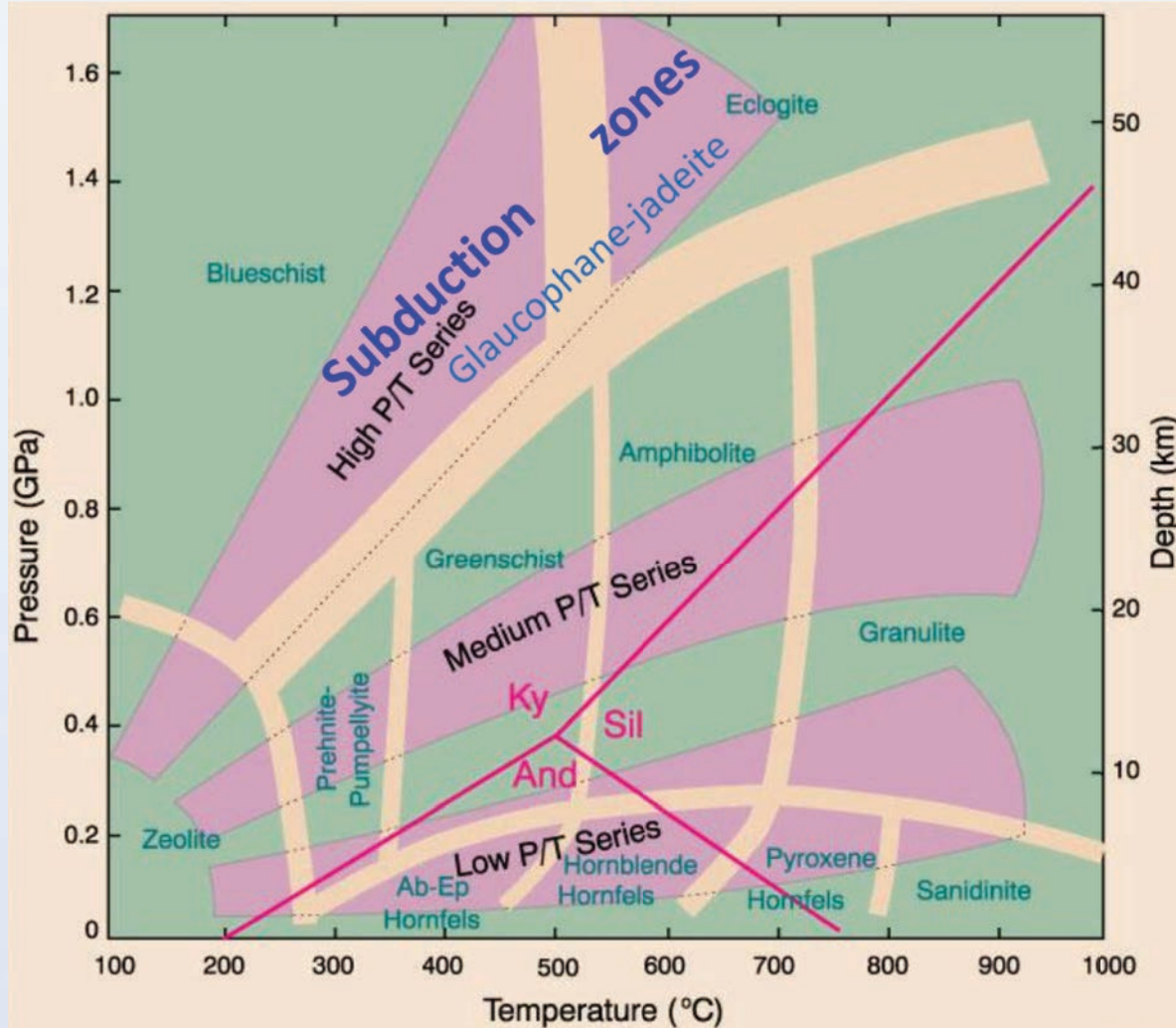
After Raymond (1995)

Serie di facies metamorfiche



Griglia delle facies (arancione), gradienti termici (curve tratteggiate), curva di anatessi di granito a $P = P_{H_2O}$ (rosso) e campi di stabilità dei polimorfi Al_2SiO_5 (Holdaway, 1976; verde)

Serie di facies e contesto geotettonico



Metamorfismo di basso gradiente termico ($<15^{\circ}\text{C}/\text{km}$) o di alta P e bassa T (=alto P/T)

tipico di zone di subduzione

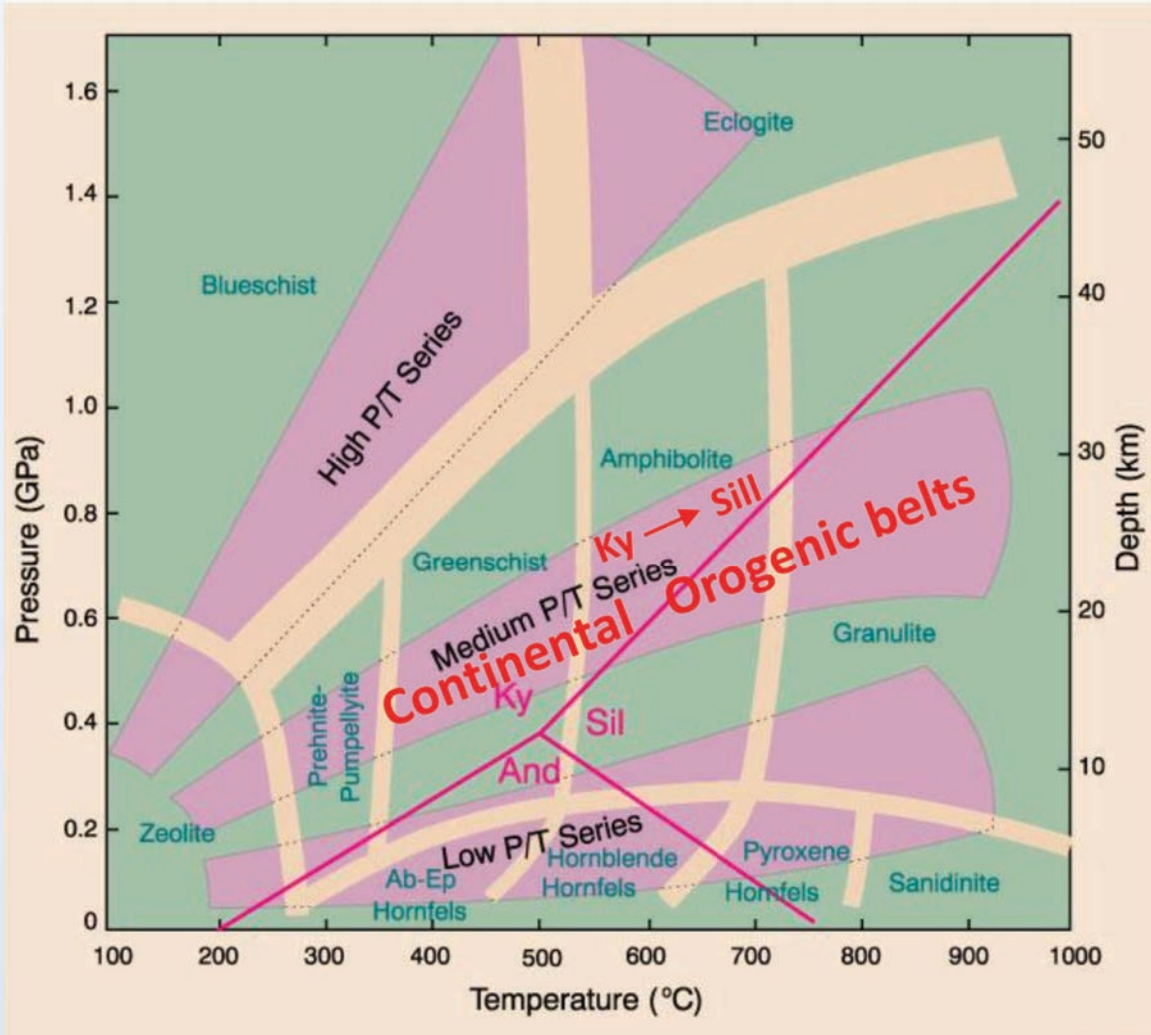
Sequenza di facies:

(zeolite) \rightarrow prehnite/pumpellyite
 \rightarrow scisti blu \rightarrow eclogite

La comparsa di glaucofane (anfibolo), per il suo colore blu, dà il nome alla facies:
FACIES SCISTI BLU



Serie di facies e contesto geotettonico



Metamorfismo di gradiente termico intermedio ($15 < dT/dZ < 40$ °C/km)

tipico di catene orogeniche

Serie Barroviane

Sequenza di facies:

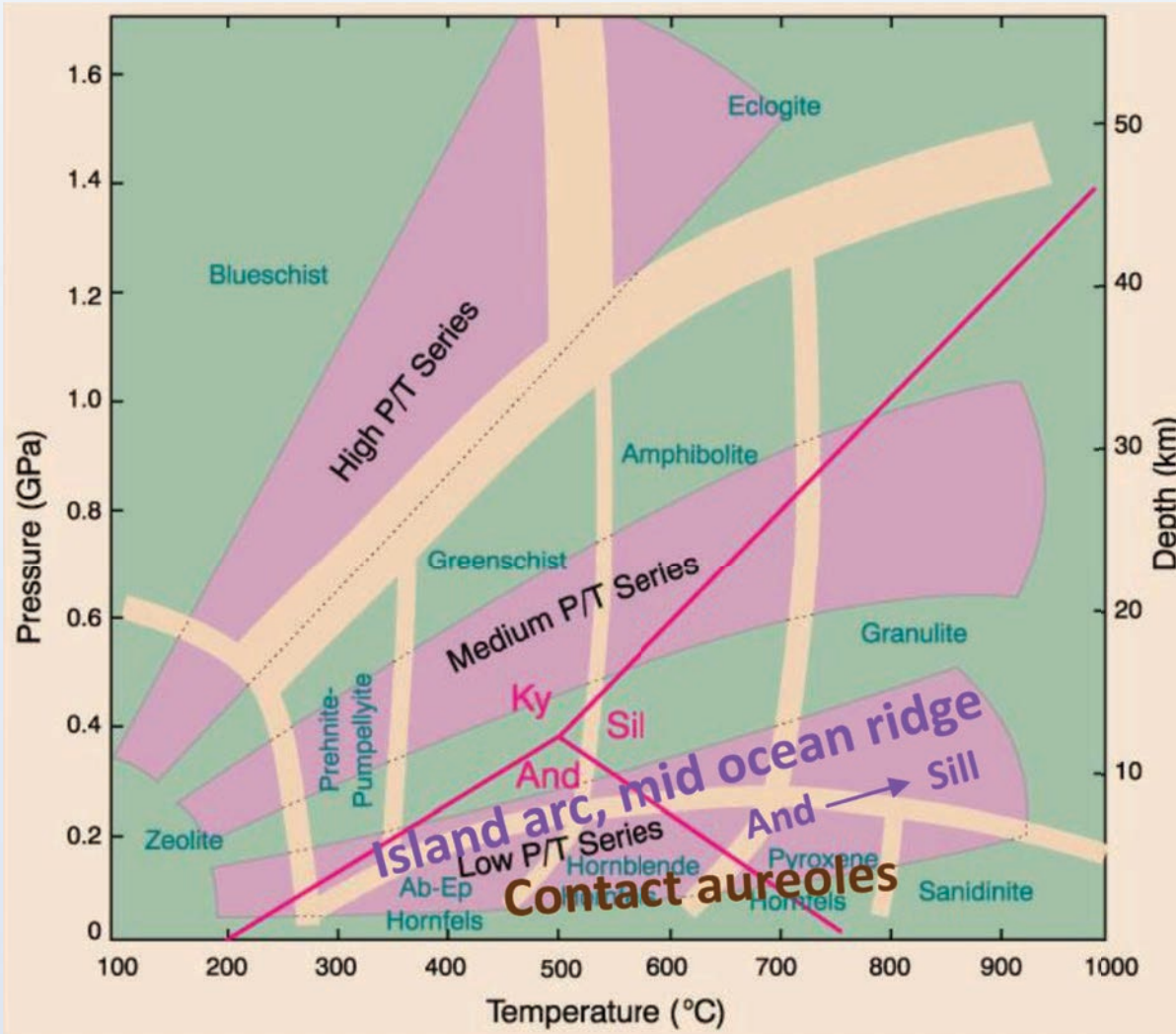
scisti verdi → anfiboliti → granuliti *

In rocce pelitiche, per T crescente:

Clorite → Biotite → Granato → Staurolite → Cianite → Sillimanite

*se $P_{tot} = P_{H_2O}$ si ha fusione crostale nella facies anfibolitica di alta T. La facies granulitica sarà quindi presente solo per $P_{tot} \ll P_{H_2O}$ condizioni che si verificano o per una crosta già disidratata, già fusa, o per $P_{CO_2} \gg P_{H_2O}$

Serie di facies e contesto geotettonico



Metamorfismo di gradiente termico alto (>40 °C/km)

Archi vulcanici, dorsali oceaniche, metamorfismo di contatto.

Sequenza di facies:

scisti verdi → anfiboliti → granuliti
MA si hanno varianti di bassa P con cordierite e andalusite in metapeliti.

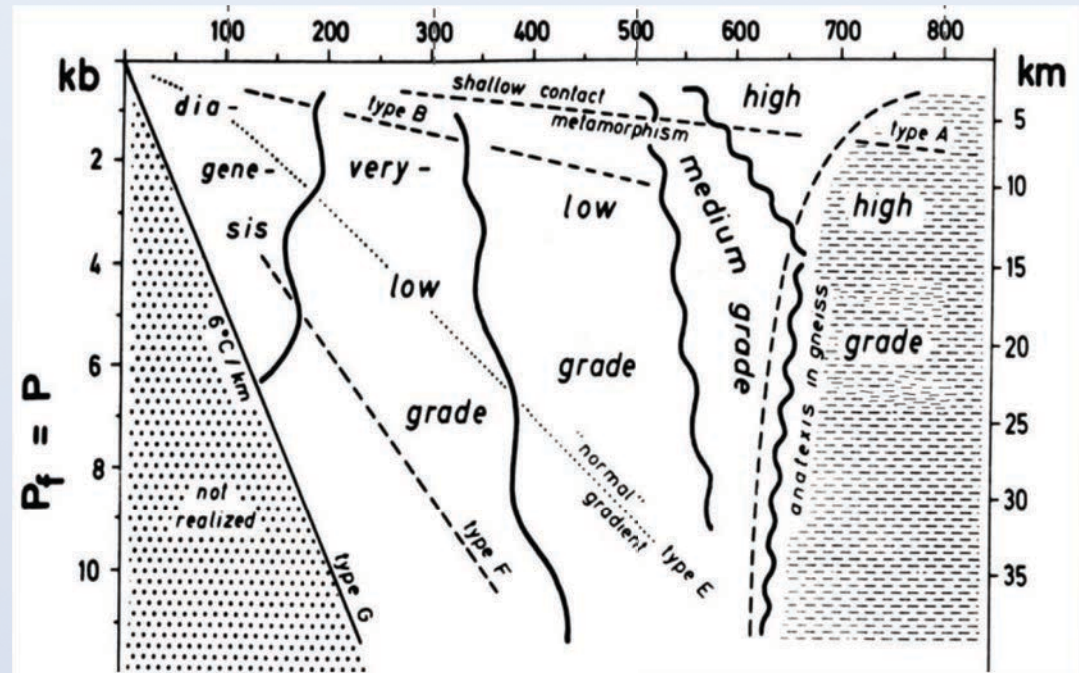
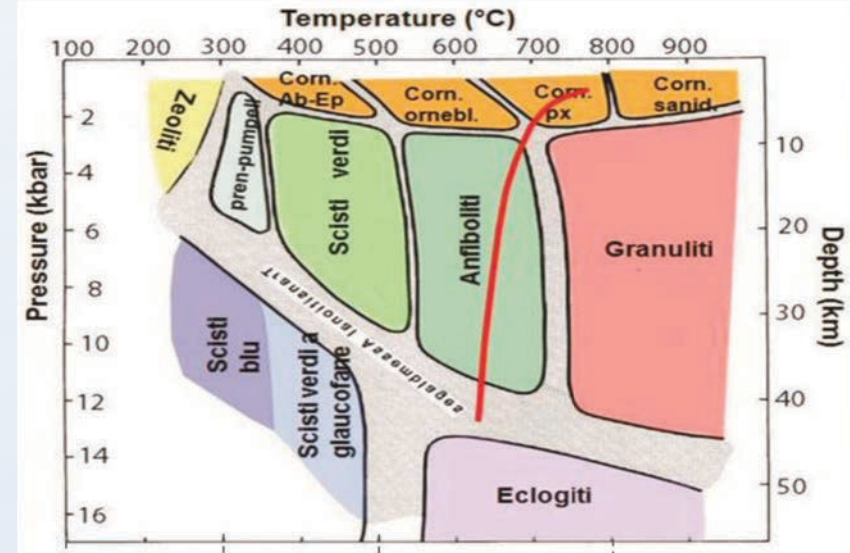
In rocce pelitiche, per T crescente:

Clorite → Biotite → Andalusite → Cordierite → Sillimanite

Assenza di staurolite, cianite e granato

Grado metamorfico e Facies

GRADO	intervallo T	
molto basso	200-300/350 °C	zeol/preh-pumpell. scisti blu ($P_{lit} = P_{H_2O}$)
basso	300/350-500/550 °C	scisti verdi + ($P_{lit} = P_{H_2O}$) scisti verdi a glaucof.
medio	500/550-600/650 °C	anfibolitica ($P_{lit} = P_{H_2O}$)
alto	>650 °C	anfibolitica ($P_{lit} = P_{H_2O}$)
molto alto	>750 °C	granulitica ($P_{H_2O} \approx 0$)



Concetti di base - riassunto

GRADO METAMORFICO: intensità termica del processo metamorfico (es.: alto grado = alta temperatura)

ZONA METAMORFICA: porzione di un terreno metamorfico caratterizzato da un definito grado metamorfico. Per analogo protolite (all'equilibrio), le rocce appartenenti alla stessa zona avranno la stessa associazione di minerali.

MINERALE INDICE: si forma in un ben determinate condizioni P-T e resta stabile entro un ben definito intervallo P-T, la sua prima comparsa indica il passaggio di grado metamorfico o di facies metamorfica.

FACIES METAMORFICA : condizioni P-T in cui (all'equilibrio) si sviluppano ben definite associazioni mineralogiche in funzione della composizione del protolite.

SERIE METAMORFICA : sequenza di facies metamorfiche controllata da un definito gradiente termico. Tre fondamentali serie metamorfiche: di alto ($>40^{\circ}\text{C}/\text{km}$), intermedio ($15\text{-}40^{\circ}\text{C}/\text{km}$) e basso gradiente termico ($10^{\circ}\text{C}/\text{km}$)