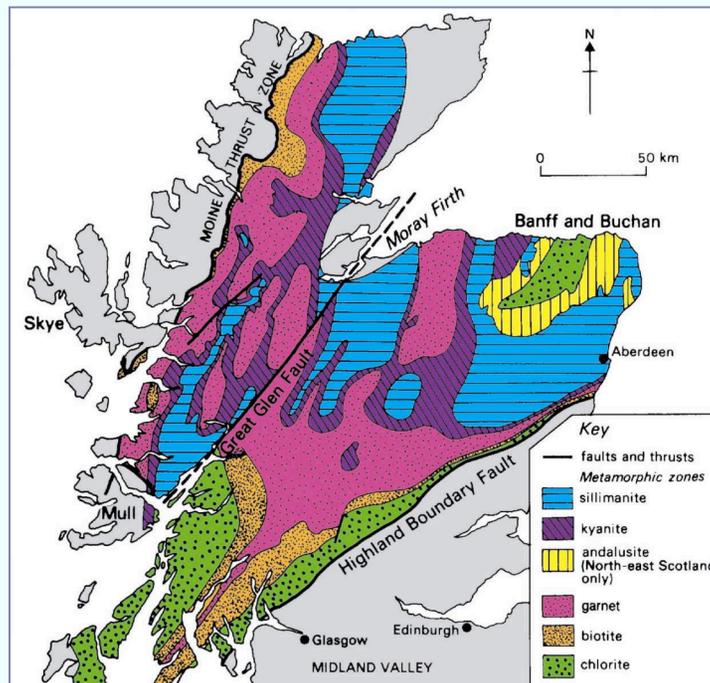
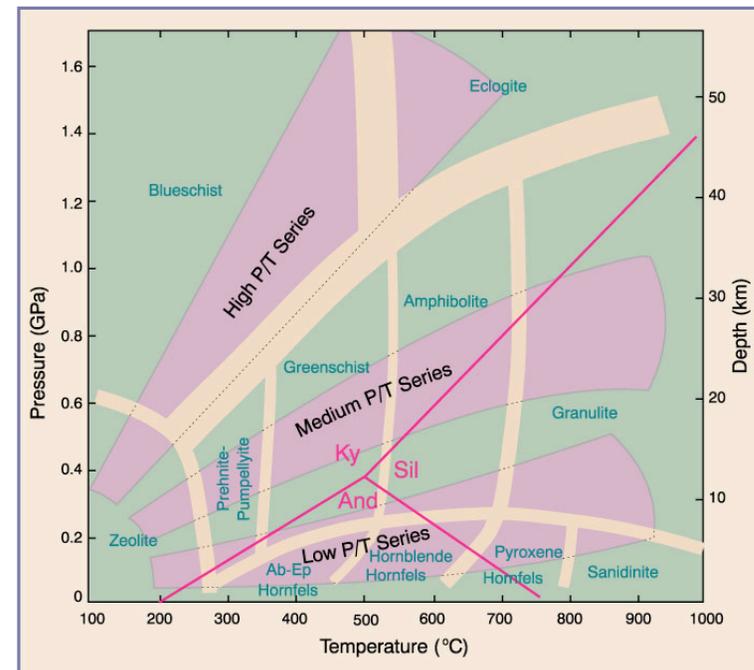


# 6. Grado metamorfico - Facies metamorfiche

## Serie di facies e gradienti termici metamorfici



(after Winter, 2001)

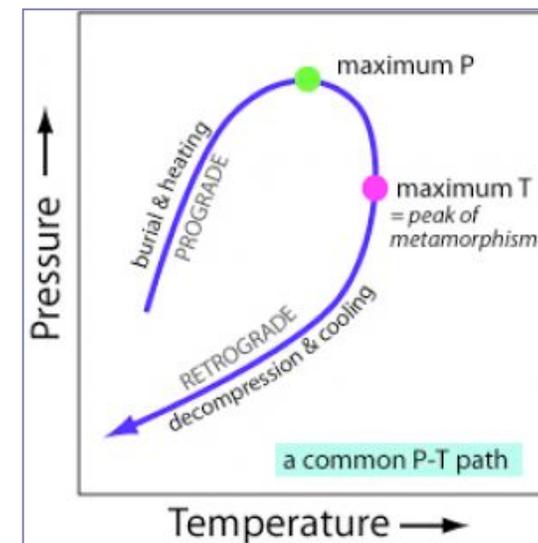


## Grado metamorfico e zoneografia metamorfica

+ **Grado metamorfico**: indicazione qualitativa delle condizioni fisiche (**T** soprattutto) operanti durante il metamorfismo

### ◆ Gradualità delle trasformazioni metamorfiche minerali indice e zoneografia metamorfica

- Metamorfismo progrado
- Associazioni mineralogiche di picco T
- Metamorfismo retrogrado



(Image courtesy of Dex Perkins)

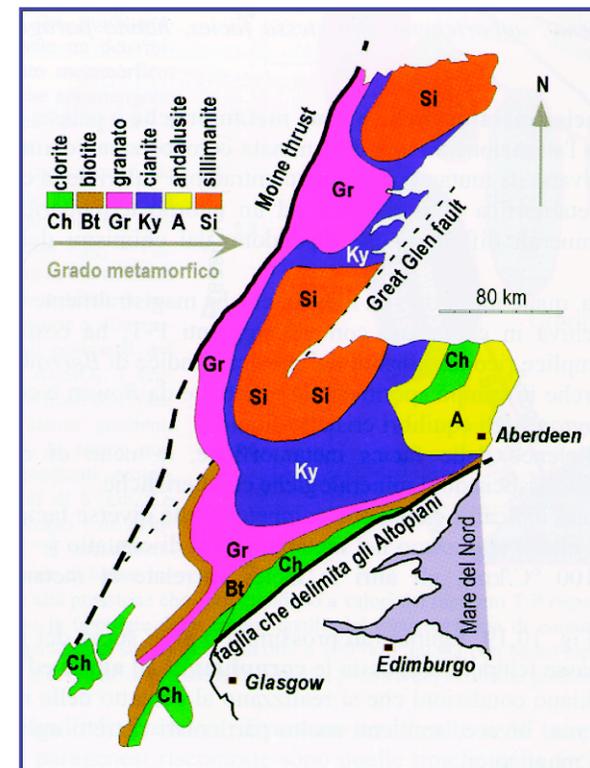
## Grado metamorfico e zoneografia metamorfica

### Minerali indice e zoneografia metamorfica

George Barrow è stato il primo a riconoscere e cartografare (1893-1912) l'esistenza di una *zoneografia metamorfica* in metapeliti della regione di Dalradian, Scottish Highlands:

- i- sequenza di minerali (*minerali indice*)  $chl \Rightarrow bt \Rightarrow gt \Rightarrow st \Rightarrow ky \Rightarrow sil$
- ii- aumento della grana dei minerali

→ il tutto interpretato in termini di **aumento del grado di metamorfismo**



(Morbidelli, 2003)

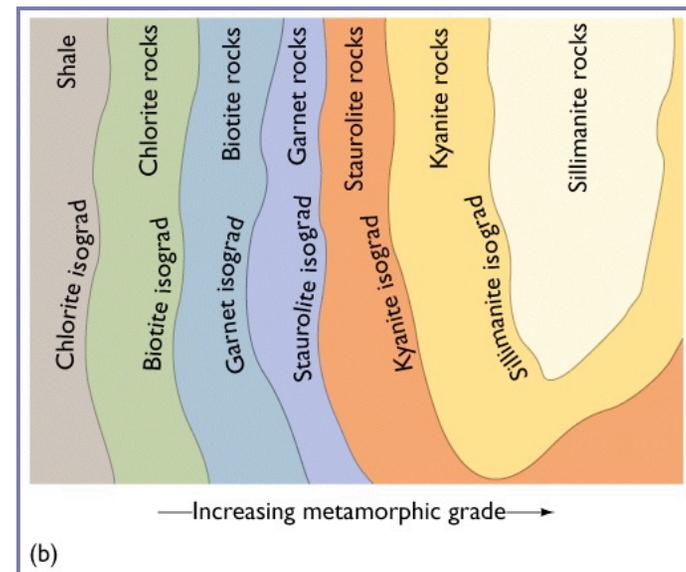
## Minerali indice e zoneografia metamorfica

+ i minerali indice sono distribuiti in *maniera sistematica* in aree distinte (*zone*)

+ il *limite di basso grado* di ogni *zona* è definito in mappa da una linea che unisce i punti di *prima comparsa* di un *minerale indice*. La *zona* prende il nome dal minerale

+ il lavoro di Barrow è stato continuato da Tilley che introdusse il concetto di *isograda* (linea di grado metamorfico costante) come *limite tra le diverse zone metamorfiche*

(Press & Siever, 1997)



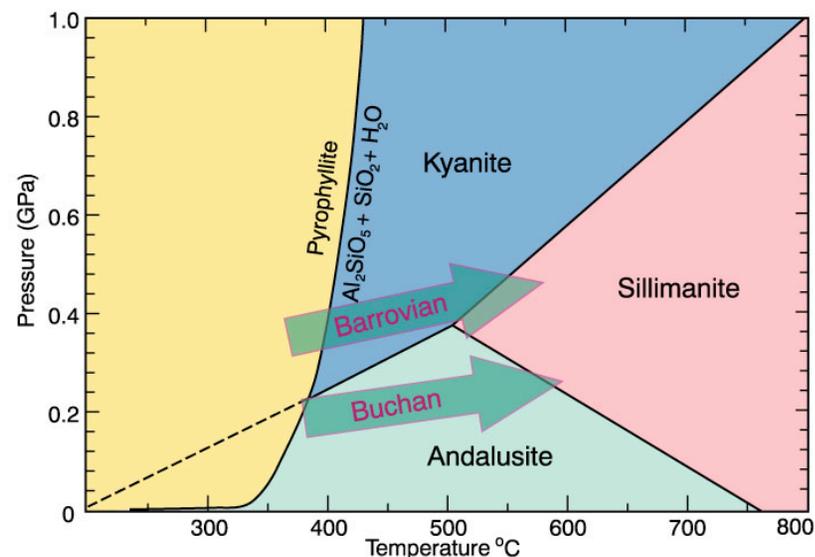
**Isograda:** limiti tra zone metamorfiche (zone minerali) definiti da reazioni discontinue che segnano la prima apparizione di un minerale

## Minerali indice e zoneografia metamorfica

- Il metamorfismo che presenta la sequenza di minerali metamorfici trovata da Barrow è detto **metamorfismo di tipo Barroviano (IP/serie a Ky-Sil)**

(Fig. after Winter, 2001)

-In tempi successivi “mappando” le rocce metamorfiche dei distretti di Banff e Buchan (N area studiata da Barrow), è stata trovata una **diversa sequenza di minerali indice:**



**(chl ⇒ bt ⇒ crd ⇒ and ⇒ sil)**

- questa sequenza è nota come **metamorfismo tipo Buchan**

**(LP/HT- serie ad And-Sil)**



## **Facies metamorfiche**

Il concetto di facies metamorfica introdotto da Eskola (1915) fornisce *un'approssimativa classificazione genetica delle rocce metamorfiche in termini delle 2 variabili fisiche P-T:*

✓ *insieme di associazioni mineralogiche, sistematicamente associate nello spazio e nel tempo, che si formano all'equilibrio nel medesimo intervallo di condizioni P-T a partire da rocce di qualsivoglia composizione*

- ◆ On the basis of the **relationship between rock composition and mineral assemblage, and the worldwide occurrence of virtually identical mineral assemblages**, Eskola (1915) developed the concept of metamorphic facies
- ◆ Eskola's facies were initially based on metamorphosed **mafic rocks**
- ◆ Basaltic rocks occur in ~ all orogenic belts, so **facies provided a convenient way to compare metamorphic areas around the world**

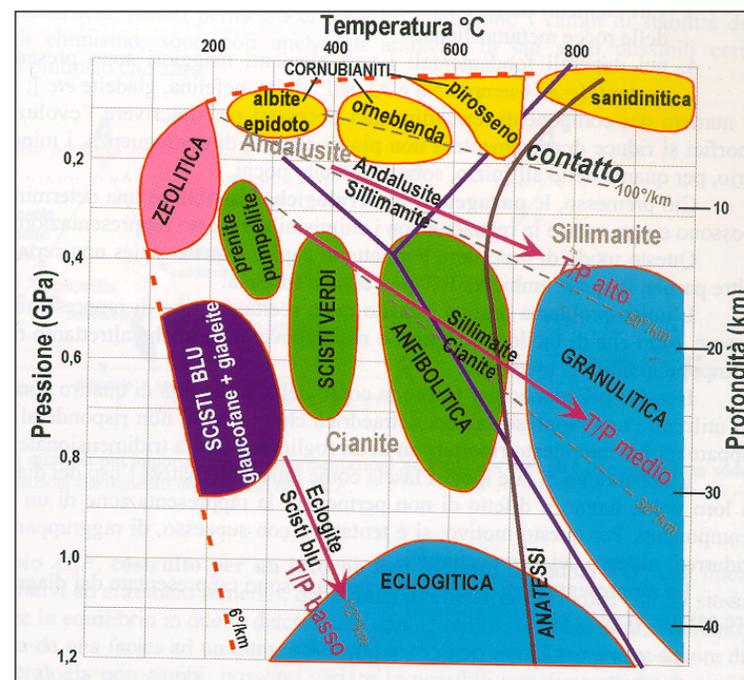
## Facies metamorfiche

Stretta correlazione tra

# Xrocce-Associazioni Mineralogiche-Cond P-T

In rocce metamorfosate nelle stesse condizioni P-T **differenti associazioni mineralogiche** indicano **differenti composizione (X)**

A parità di X, **differenti associazioni mineralogiche** indicano **differenti condizioni P-T**

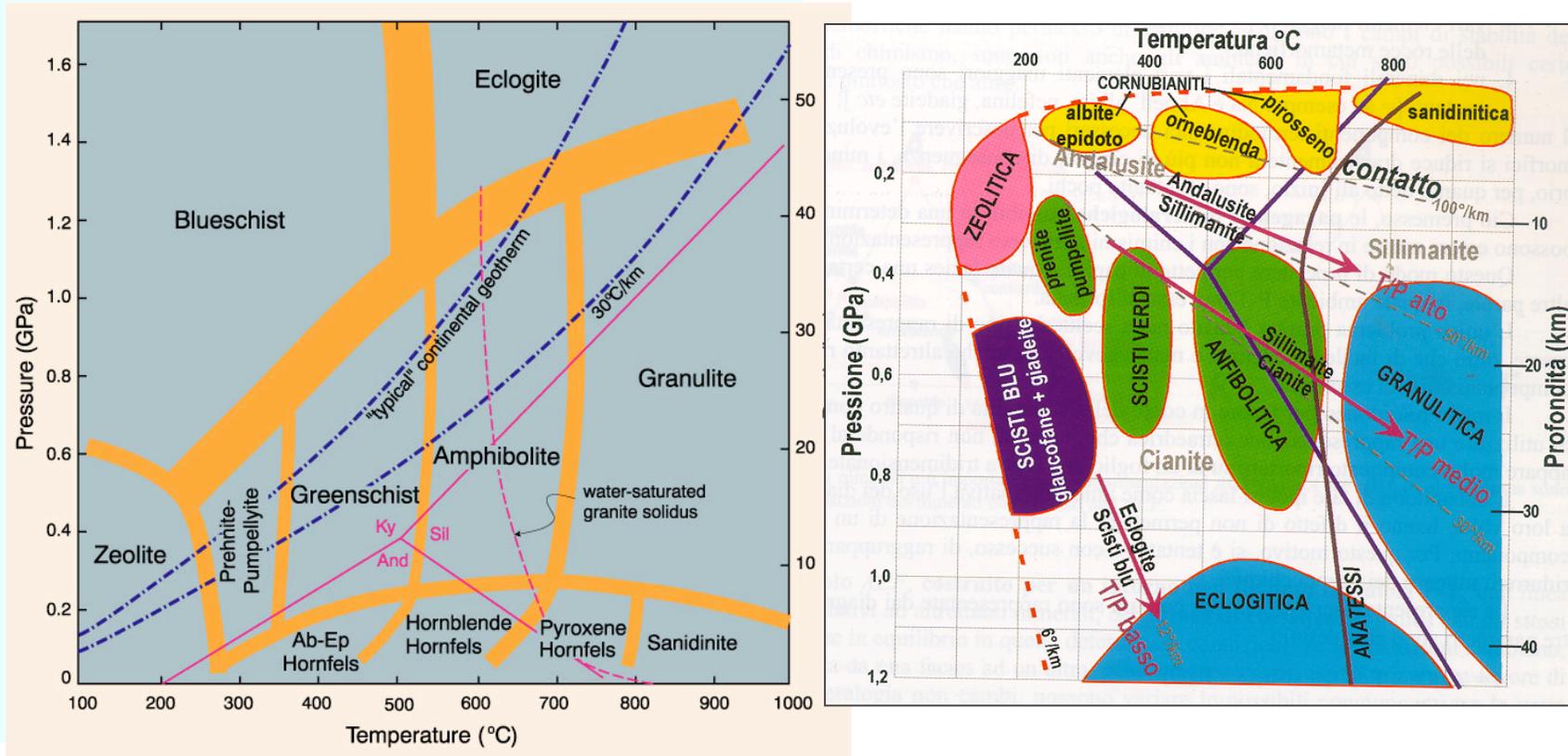


(Morbidelli, 2003)

## Facies metamorfiche

Winter, 2001

Morbidelli, 2003



Temperature-pressure diagram showing the generally accepted limits of the various facies. Boundaries are approximate and gradational. The “typical” or average continental geotherm is from Brown and Mussett (1993).

“La Scienza come arte dell’approssimazione” (Luca Cavalli-Sforza)

## + Facies metamorfiche: associazioni mineralogiche diagnostiche (*rocce basiche*)

### 4.3 Metamorphic Facies

**Table 4.1.** Diagnostic minerals and assemblages from the various metamorphic facies

Facies	Diagnostic minerals and assemblages
Subgreenschist	Laumontite, prehnite + pumpellyite, prehnite + actinolite, pumpellyite + actinolite, pyrophyllite
Greenschist	Actinolite + chlorite + epidote + albite chloritoid
Amphibolite	Hornblende + plagioclase staurolite
Granulite	Orthopyroxene + clinopyroxene + plagioclase, sapphirine, osumilite, kornierupine <i>no</i> staurolite, <i>no</i> muscovite
Blueschist	Glaucophane, lawsonite, jadeitic pyroxene, aragonite Mg-Fe-carpholite <i>no</i> biotite
Eclogite	Omphacite + garnet <i>no</i> plagioclase

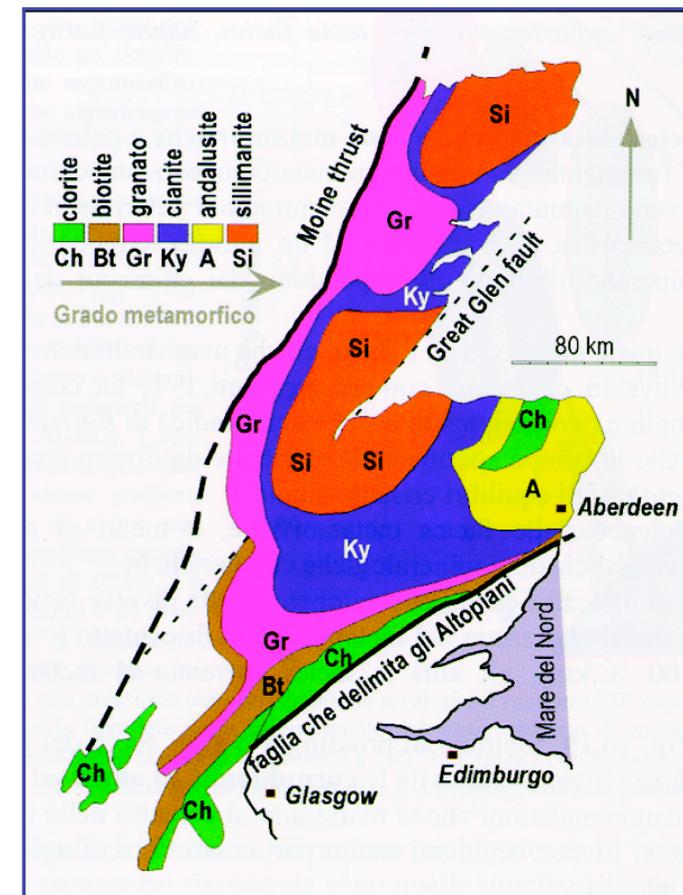
## ☄ Serie di facies e gradiente termico metamorfico

Per lungo tempo si è ritenuto che la sequenza di *minerali indice*

● chl ⇒ bt ⇒ gt ⇒ st ⇒ ky ⇒ sil

e la *serie/sequenza di facies*

● *scisti verdi-anfibolitica-granulitica* corrispondente ad un *gradiente termico (traiettoria T/P) intermedio* riscontrate negli altipiani scozzesi (*Dalradian zone, Scottish Highlands*) *fossero tipiche di tutte le catene orogeniche*



## Serie di facies

✚ Miyashiro (1961, 1973) è stato il primo a mettere in evidenza la presenza di **serie di facies differenti (HP, IP, LP) in f del contesto geotettonico**, dovute a **diversità di traiettorie P-T** durante il metamorfismo

### 1) Facies di alta pressione (HP)

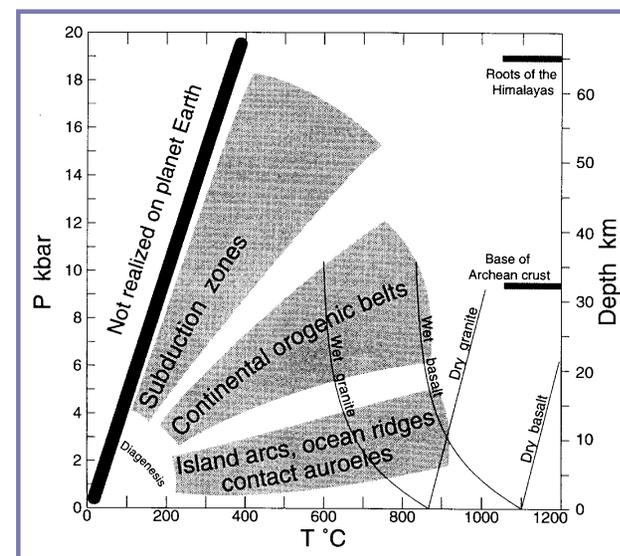
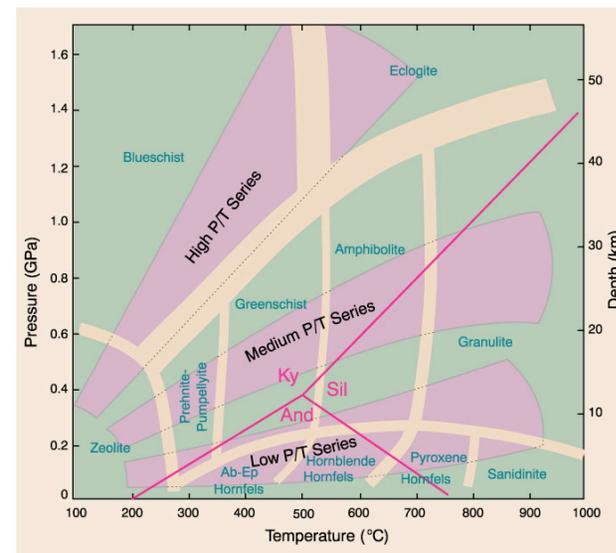
✚ **The blueschist and eclogite facies:** occurs in areas of low T/P gradients ( $\sim 15^\circ\text{C}/\text{km}$ )  
Contesto geotettonico: **zone di subduzione**

### 2) Facies di pressione intermedia (IP)

✚ Most metamorphic rocks now exposed at the surface of the Earth belong to the **greenschist, amphibolite, or granulite facies** ( $\sim 25^\circ\text{-}30^\circ\text{C}/\text{km}$ )

Contesto geotettonico: **catene orogeniche continentali**

*“La Scienza come arte dell’approssimazione” (Luca Cavalli-Sforza)*

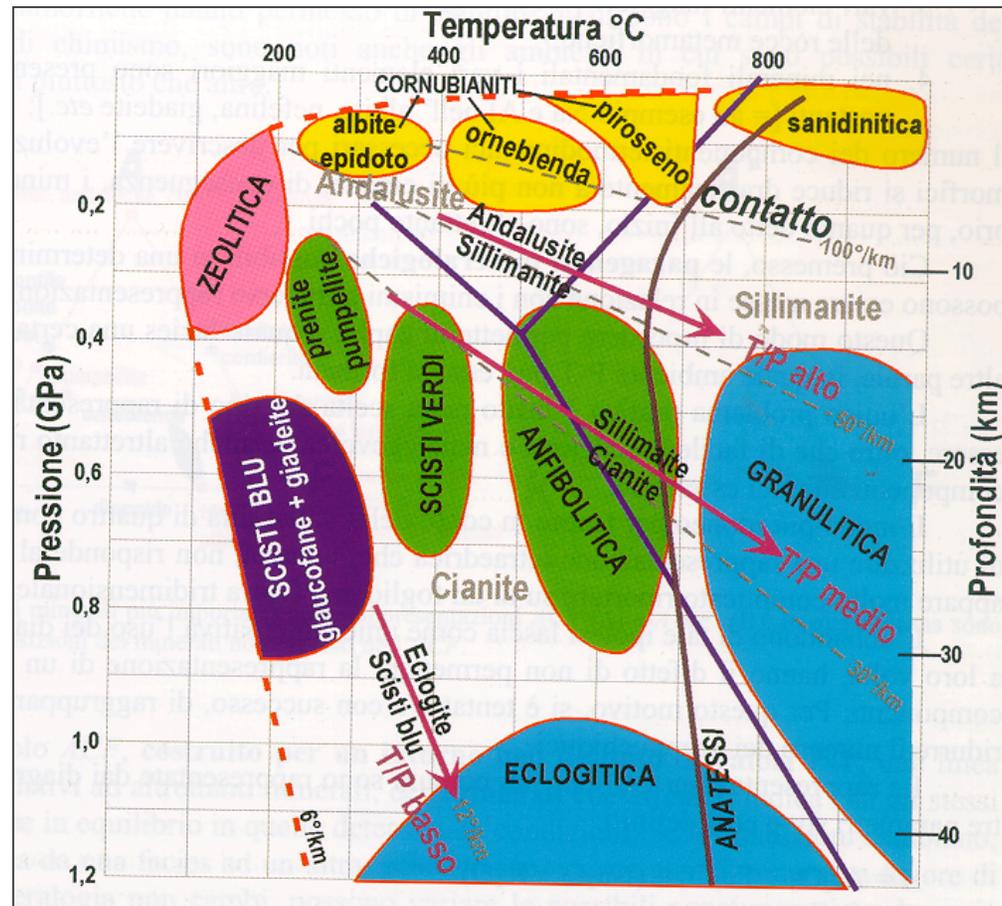


### 3) Facies di bassa pressione (LP/HT)

✚ Facies delle cornubianiti ad albite-epidoto, cornubianiti ad omblenda e cornubianiti a pirosseno:

✚ aureole metamorfiche di contatto e terreni metamorfici di contesti con elevati gradienti geotermici ( $50^{\circ}$ - $100^{\circ}$ C/Km)

Contesto geotettonico:  
archi insulari-ridge medio-oceanici - aureole di contatto



*Facies di bassa P*

La facies **sanidinitica** rappresenta ambienti molto particolari ristretti a **xenoliti in magmi basici** (*pirometamorfismo*) e alle parti più interne di alcune aureole di contatto adiacenti a intrusioni basiche, con raggiungimento di T idonee a innescare fenomeni di  *fusione parziale*  con formazione di *rocce vetrose* denominate **buchiti**

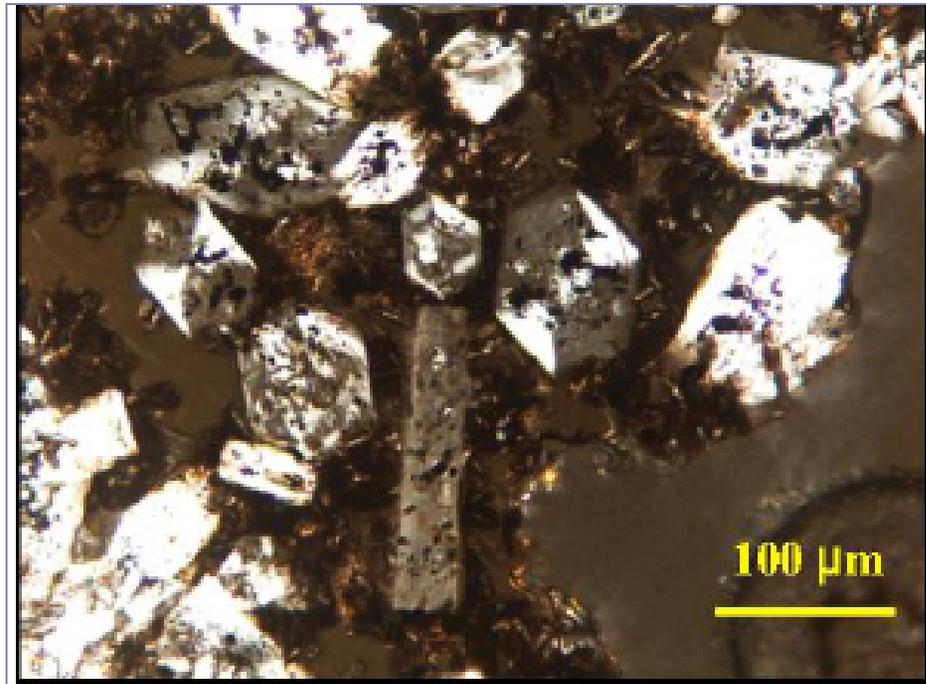


Fig. 3 – Tabular and hexagonal cordierite crystals with sector twinning and partially resorbed core, dispersed in a sillimanite + glass groundmass.

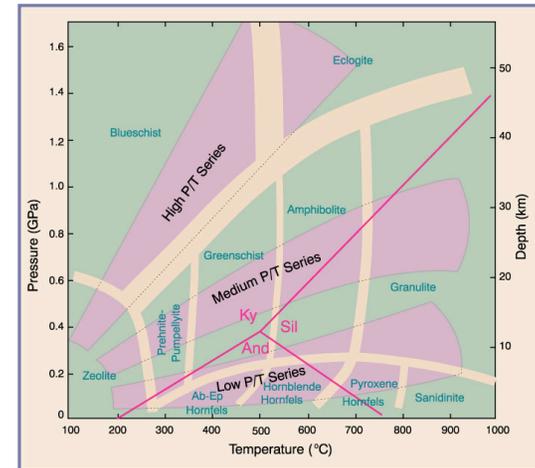
(Fig.3 buchite xenolith of Stromboli; after S. Del Moro, 2008: PhD Thesis, Urbino)

## Gradiente termico metamorfico

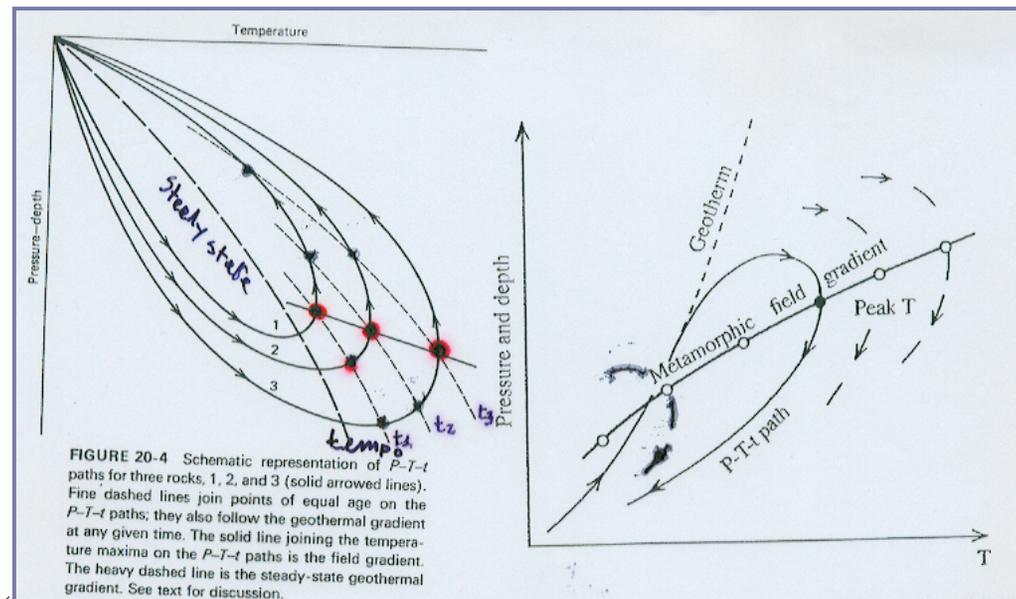
Le diverse serie di facies sono caratterizzate da valori differenti del **gradiente termico metamorfico** (traiettorie P-T)

Il **gradiente termico metamorfico\*** (geoterma metamorfica policrona) non

rappresenta una geoterma reale: è semplicemente una **linea che unisce i punti di Tmax dei path P-T** definiti dalle diverse rocce (Philpotts 1990, Fig. 20.4)



\*metamorphic field gradient or piezo-thermic array



## Gradiente termico metamorfico

# Gradiente termico metamorfico vs. gradiente geotermico

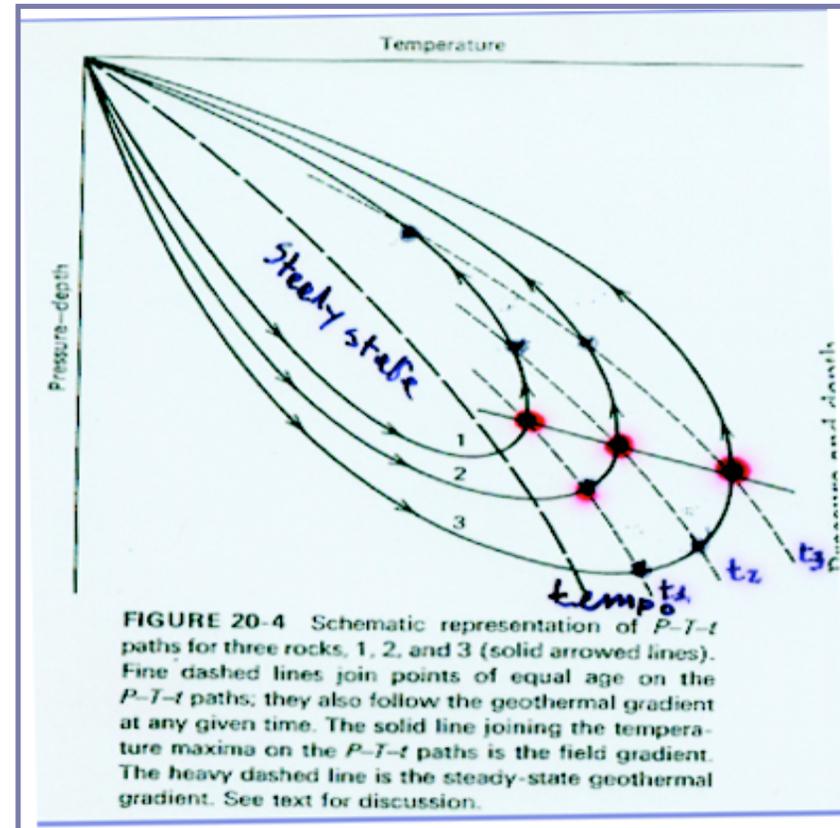
- Le rocce 1, 2, 3 raggiungono i loro max di T in tempi differenti ( $t_1$  vs.  $t_2$  vs.  $t_3$ ).
- Il **gradiente termico metamorfico** registrato dalle rocce (*curva continua*) ha una pendenza decisamente differente da quella del gradiente geotermico (linee tratteggiate sottili) al tempo  $t_1 \dots T_n$ .

Il valore del **gradiente termico metamorfico**

**basso – intermedio - alto**

i) definisce la **serie di facies (tipo di metamorfismo)**;

ii) rappresenta una **sequenza di condizioni P-T dell'intero evento metamorfico realizzatesi in tempi successivi**



## ● Metamorfismo a $P_{H_2O} \ll P_{Tot}$ : Granuliti

+ Rocce metamorfiche di *alto grado* di *derivazione pelitica, mafica o quarzo-feldspatica, metamorfosate in condizioni di alta  $T > 700$  °C e  $P_{H_2O} \ll P_{tot}$*



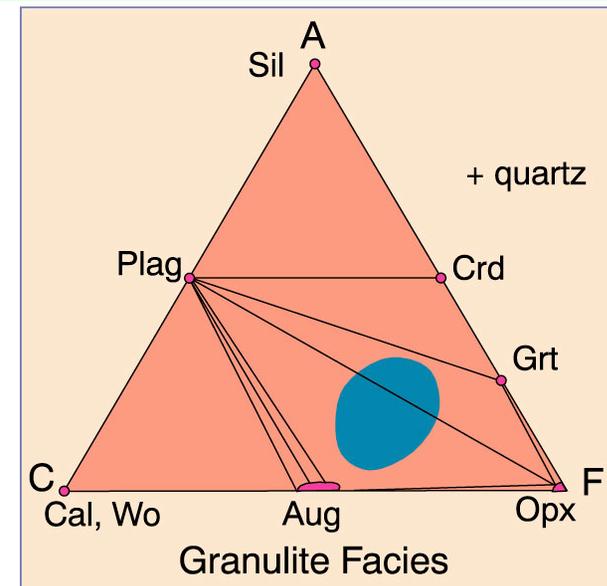
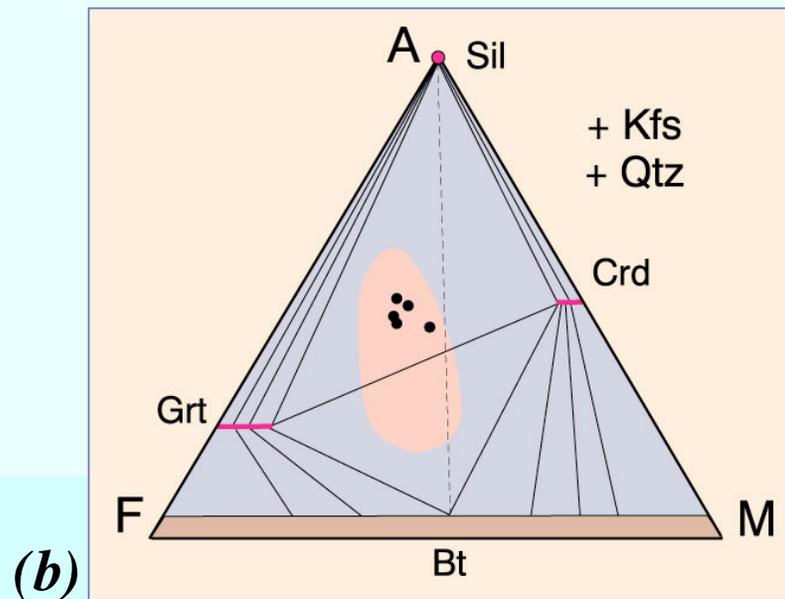
## Granuliti

### + Mineralogia: *paragenesi* in prevalenza *anidre*

➤ associazione a **opx+cpx** in **rocce basiche** di composizione idonea (a)

➤ **assenza di muscovite** nelle rocce metapelitiche (b)

(Figs after Winter, 2001)



## ◆ **Contesti geotettonici**

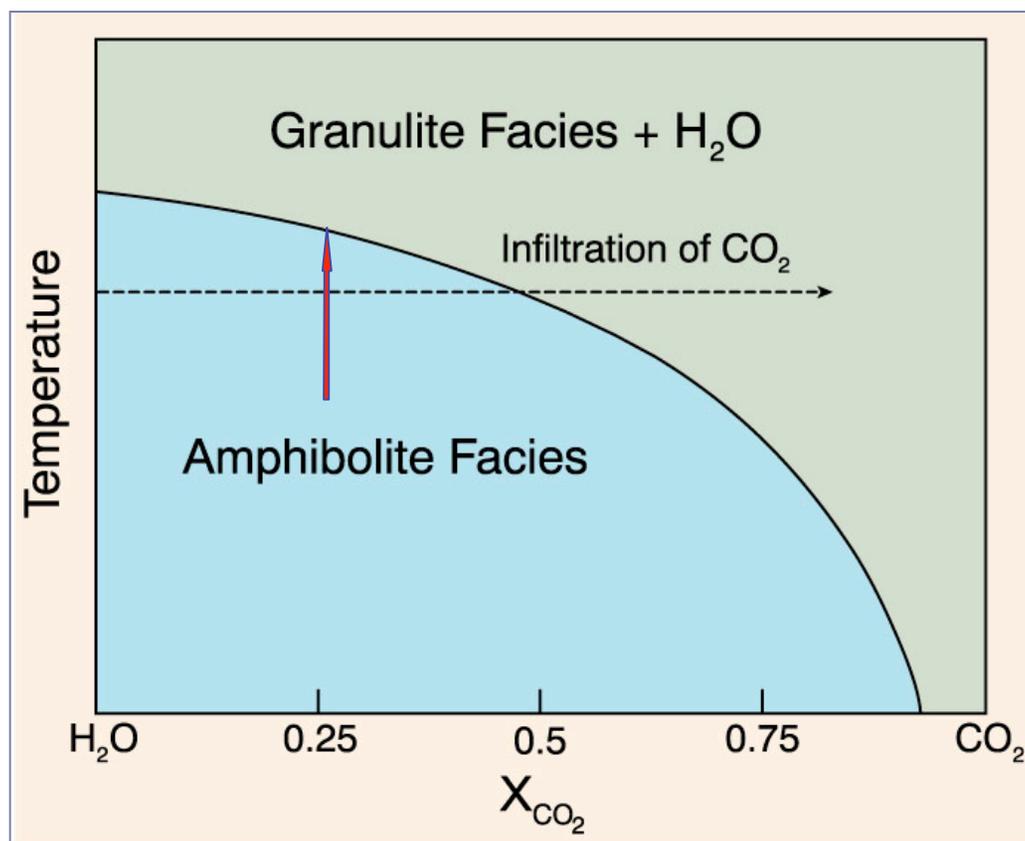
- i) ispessimento crostale (catene collisionali)*
- ii) underplating di magmi basaltici (contesti estensionali)*

## ◆ **Processi responsabili**

- 1- deidratazione in subsolidus*
- 2-polimetamorfismo* (metamorfismo di rocce già deidratate)
- 3-dehydration melting*: residuo di fusione parziale di un processo anatettico a scala regionale

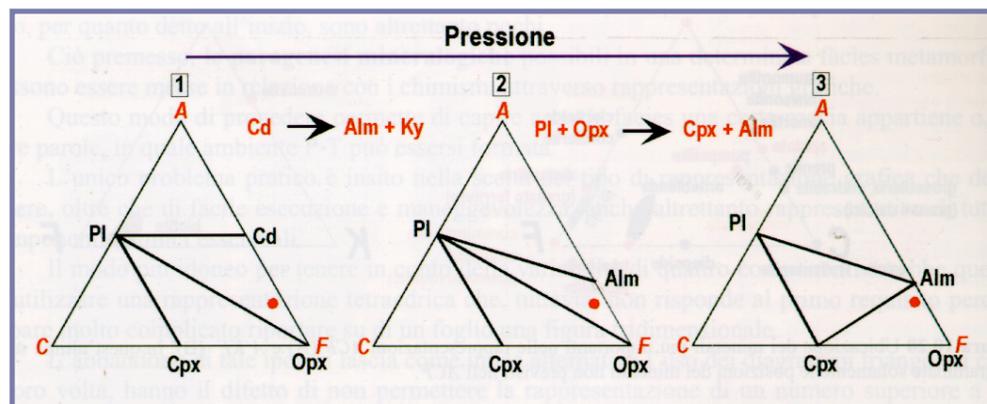
## 4- metamorfismo in presenza di una fase fluida $CO_2$ ricca

Figure 29-8. Schematic  $T-X_{CO_2}$  diagram illustrating the characteristic shape of typical dehydration reactions, such as those that generate orthopyroxene from hornblende or biotite. Notice that the amphibolite facies to granulite facies can be accomplished by either an **increase in temperature** or **infiltration of  $CO_2$  at a constant temperature**. (after Winter (2001))

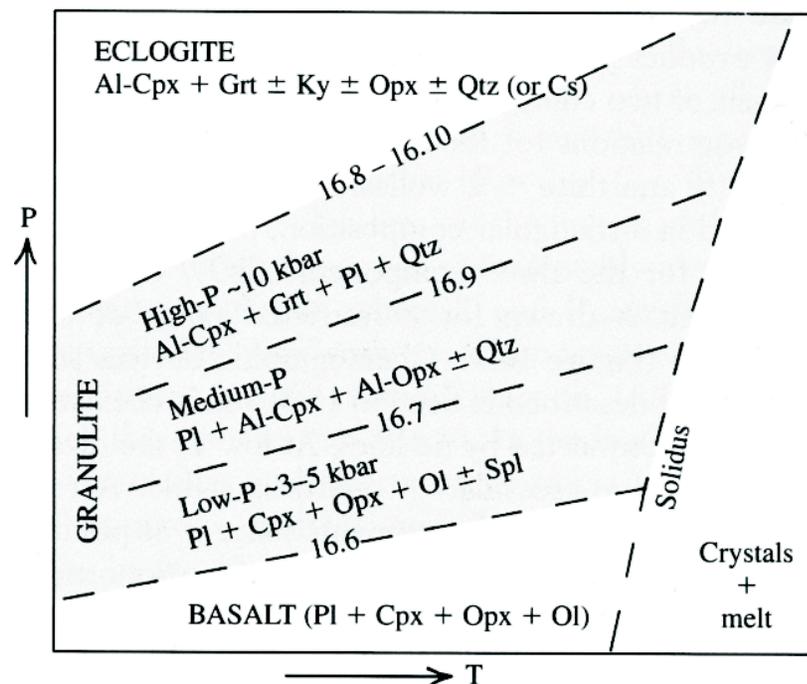


## Granuliti

### Compatibilità mineralogiche in rocce di facies granulitica

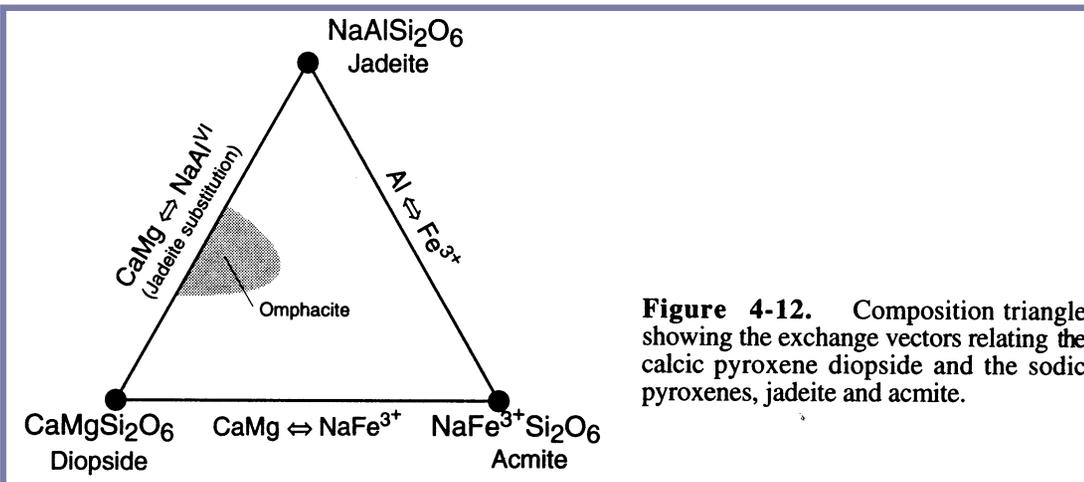


**Transizione basalto-granulite-eclogite.** Sono indicati schematicamente i campi di stabilità delle diverse associazioni mineralogiche (Best, 2003)



## ● Metamorfismo di HP: Eclogiti

✚ Rocce metamorfiche di **HP** di composizione basaltica costituite dall'associazione mineralogica diagnostica **omphacite+granato** ( $\pm ky \pm qtz / cs \pm opx$ ) (*plagioclasio out*)



(Spear, 1993)

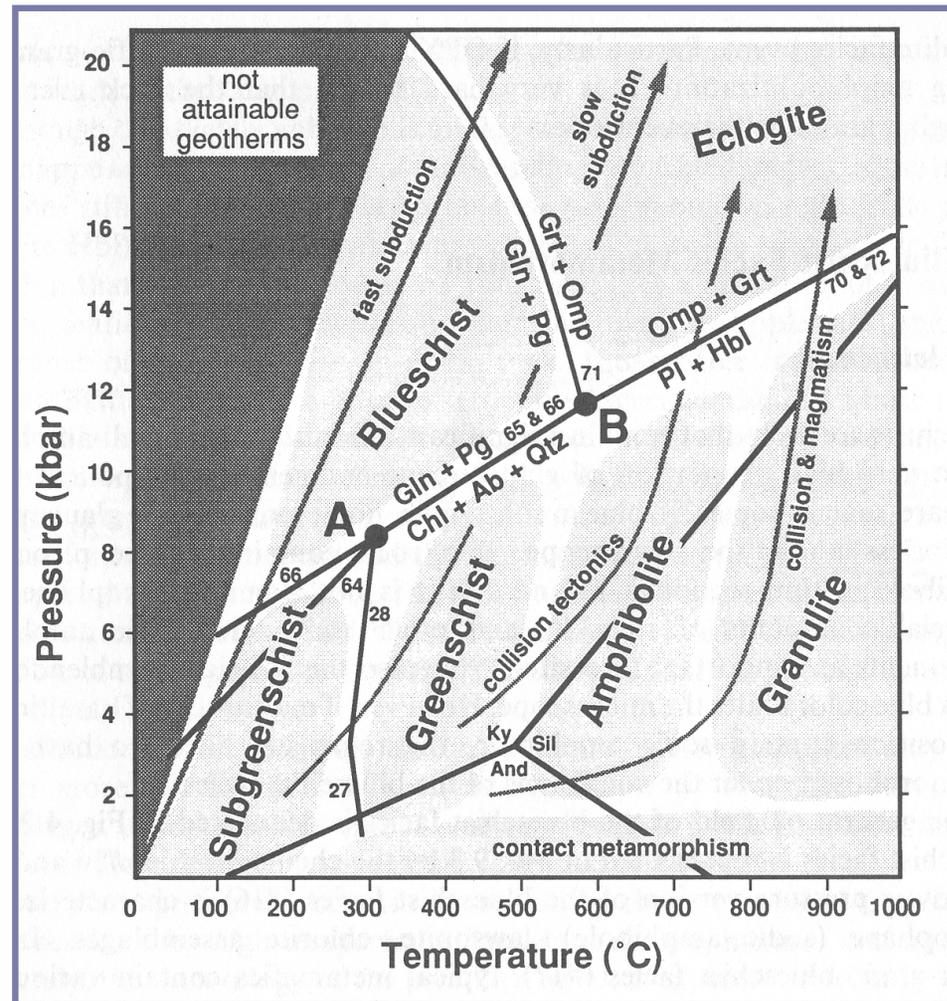
**omphacite:  $Nacpx$  di colore verde**

**granato (alm-prp-grs) di colore rosso**

“La Scienza come arte dell'approssimazione” (Luca Cavalli-Sforza)

## Eclogiti

✓ Le **eclogiti** si possono formare in **differenti contesti geologici** in un ampio range di **T** (400°- >900°C) e a **P** >11-12 kbar, secondo **3 possibili path**



High-pressure metamorphism overview ( Fig. 9.9 after Bucher & Frey, 1994)

## Eclogiti

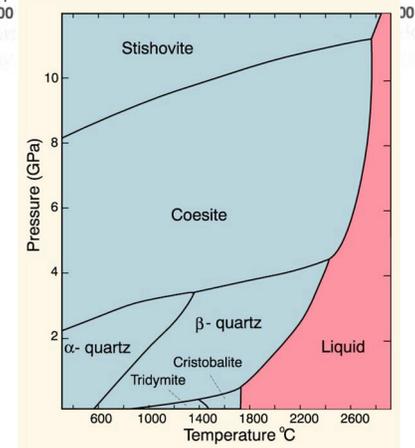
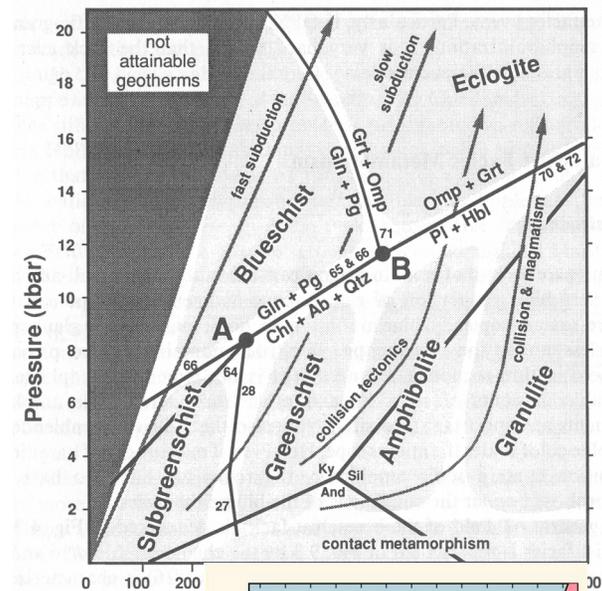
✓ Vengono classificate in **3 gruppi** in base alla **T** di equilibratura (geotermometro grt-cpx; Carswell, 1990)

✚ **LT-eclogiti:  $T < 550^{\circ}\text{C}$ ;  $P$  molto alta; presenza di coesite\* (Chopin, 1984) e/o diamante (UHP)**

➤ si formano in **contesti subduttivi** dalla **facies degli scisti blu** (corrispondono alle eclogiti del Gruppo C di Coleman et al., 1965) (bande o lenti associate a scisti blu: **eclogite-blueschist associations** in near-trench settings)

**\*coesite: polimorfo di HP ( $>20\text{ kb}$ ) della  $\text{SiO}_2$**

“La Scienza come arte dell'approssimazione” (Luca Cavalli-Sforza)



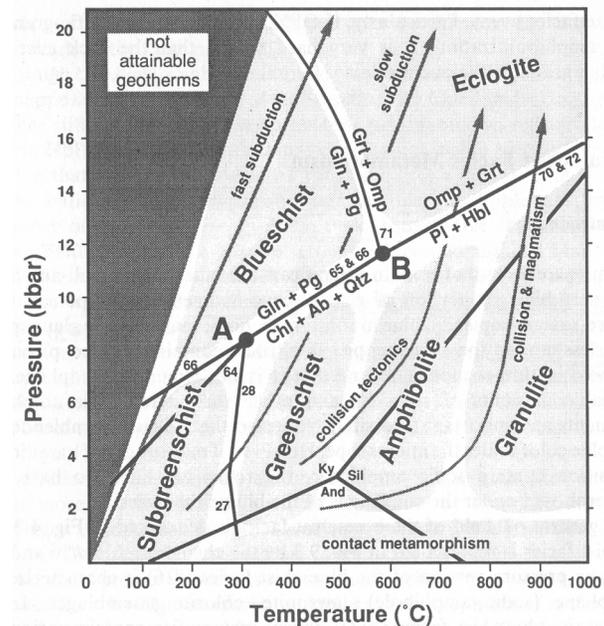
## Eclogiti

### ✚ MT-eclogiti: $T=550-900^{\circ}\text{C}$

➤ si formano in *contesti collisionali* a partire dalla *facies anfibolitica* (eclogiti del Gruppo B di Coleman et al.) (bande o lenti in gneiss migmatitici)

### ✚ HT-eclogiti: $T > 900^{\circ}\text{C}$

➤ si formano in *contesti collisionali* o “*estensionali*” con geoterme molto alte dovute a fenomeni di magma underplating, a partire dalla *facies granulitica* o per *cristallizzazione diretta da magmi basici* (eclogiti del Gruppo A di Coleman et al.) (xenoliti in basalti e kimberliti)

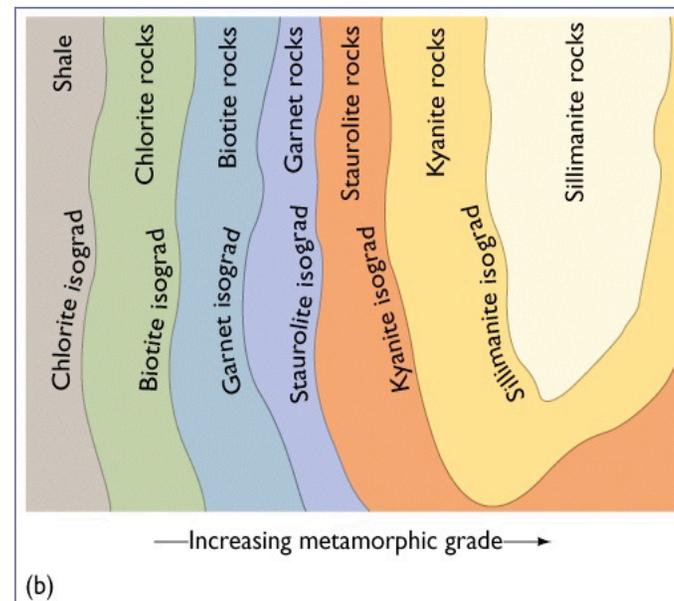


## Valutazione delle condizioni di metamorfismo

# Valutazione delle condizioni di metamorfismo (grado metamorfico)



1. Stima del grado metamorfico =  $f(T)$  direttamente sul terreno sulla base della *comparsa di minerali caratteristici* (*minerali indice*) con individuazione di *zone metamorfiche* (chl, bt, grt, st, ky, sill) separate tra loro da *isograde* (Tilley, 1925)





*Minerali indice vs. grado metamorfico*

✓ **Minerali indice vs. grado di metamorfismo: limiti**

i) non si tiene conto del *fattore compositivo* e della *natura delle reazioni* responsabili della comparsa del minerale indice

esempio

pirofillite = *cianite* + quarzo

granato + muscovite + quarzo = *cianite* + biotite + H<sub>2</sub>O

staurolite + quarzo = *cianite* + granato + H<sub>2</sub>O

ii) un minerale indice può essere ancora stabile/presente nella/e zona/e di più alto grado metamorfico



*Minerali indice vs. grado metamorfico*

➤ **i minerali indice non costituiscono un criterio univoco e soddisfacente per definire il grado di metamorfismo**

## Facies metamorfiche vs. grado di metamorfismo

### 2. Stime basate sul concetto di *facies metamorfica*

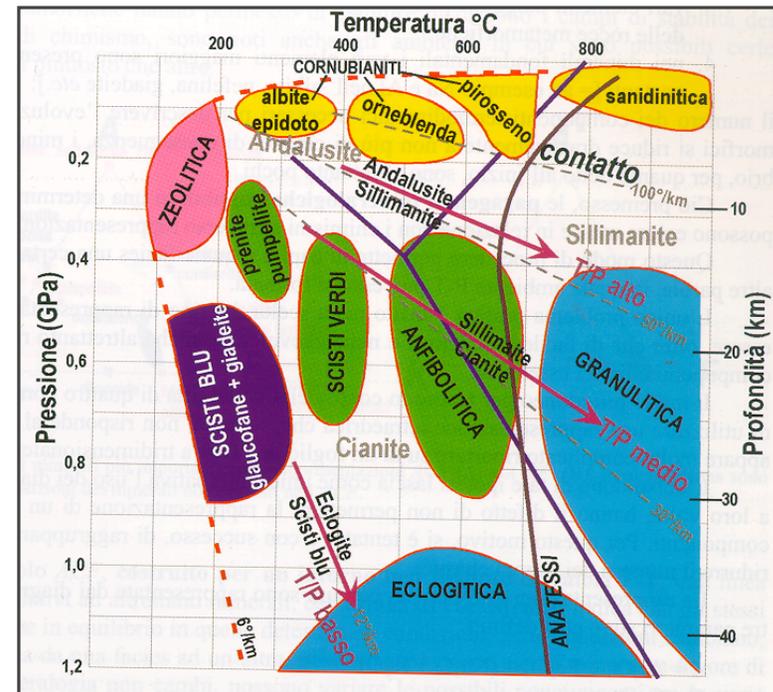
*Facies scisti verdi*

*Facies anfibolitica*

*Facies granulitica*

*Facies degli scisti blu*

*Facies eclogitica*



(Morbidelli, 2003)

### Limiti

-I campi di condizioni P-T definiti dalle diverse facies sono molto ampi: da qui l'introduzione delle *subfacies*

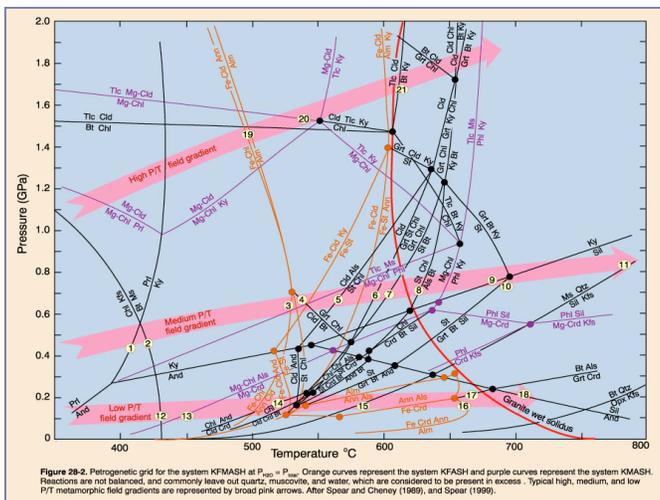
“La Scienza come arte dell'approssimazione” (Luca Cavalli-Sforza)

*Valutazione delle condizioni di metamorfismo*

● *Nella moderna petrologia le stime delle condizioni di metamorfismo si basano su:*

**1- analisi qualitative/semiquantitative**

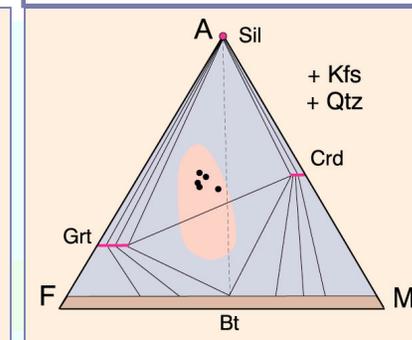
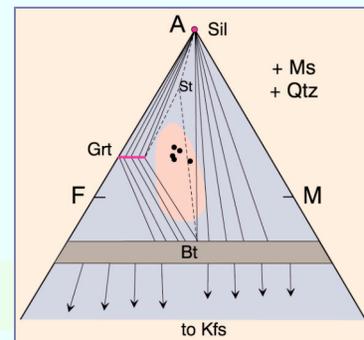
- *evidenze tessiturali e storia di reazione* →
- *griglie petrogenetiche*



Deformazione	D1	D2	F>D2	D3
Cristallizzazione	sintett		postett	
Ms [1]	[bar]			
Chl [1]	[bar]			
Bt [1]	[bar]			
P1	[bar]			
Grt [1]		[bar]		
Ms [2]			[bar]	
Bt [2]			[bar]	
St			[bar]	
Grt [2]			[bar]	
Chl [2]			[bar]	
Wm			[bar]	

T →

- *diagrammi di compatibilità* →



[http://serc.carleton.edu/research\\_education/equilibria/simplephasediagrams.html](http://serc.carleton.edu/research_education/equilibria/simplephasediagrams.html)

“La Scienza come arte dell’ approssimazione” (Luca Cavalli-Sforza)



## Valutazione delle condizioni di metamorfismo

### 2- analisi quantitative termobarometriche + eventuali stime geocronologiche

#### i. geotermobarometria convenzionale

#### ii. approccio basato sulla costruzione di *diagrammi di fase/pseudosezioni P-T* riferite a *Xchimiche* specifiche:



*forniscono le associazioni mineralogiche stabili al variare delle condizioni ambientali (P-T) nel sistema (roccia) in studio. consentendo di tracciarne la traiettoria P-T (Will, 1998; Connolly & Petrini, 2002; Hoschek, 2004).*

**(vedi Appendix)**



## APPENDIX

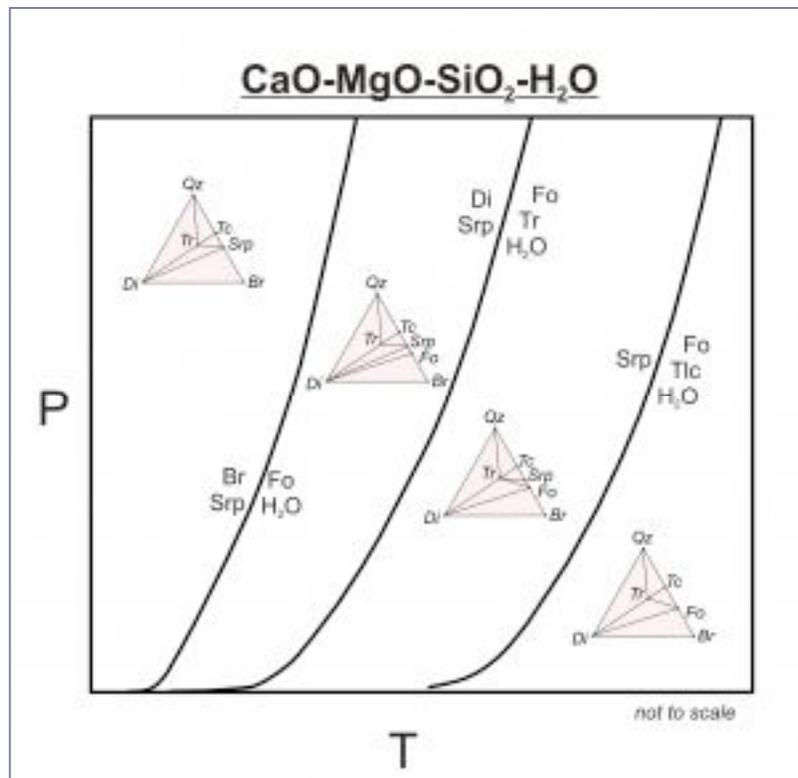
### *Diagrammi di fase standard vs. Griglie petrogenetiche vs. Pseudosezioni*

- **Diagrammi di fase standard.** Rappresentazioni grafiche delle associazioni mineralogiche di equilibrio (Gmin) in f (P-T-X).
- **Griglie petrogenetiche.** Diagrammi P-T che riportano tutte le reazioni univarianti e i punti invarianti (dove convergono le curve univarianti) possibili in un determinato sistema modello. Possono essere costruite utilizzando i dati sperimentali o su base termodinamica (v. Vernon & Clarke, 2008, cap. 2.4.5)
- **Pseudosezioni.** Diagrammi di fase che mostrano i *campi di stabilità* (non le reazioni) delle diverse associazioni mineralogiche di equilibrio per una definita Xchimica(roccia). Vengono considerate/rappresentate solo le reazioni che coinvolgono la composizione specifica (roccia).

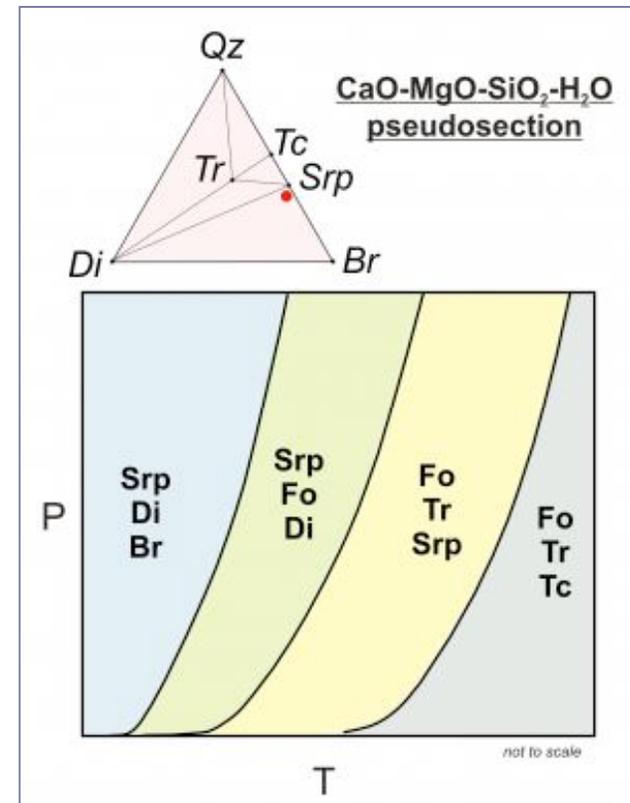


# APPENDIX

Schematic P-T diagram showing several low temperature reactions in the system CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, with compatibility Diagrams **(a)**.



**(a)**

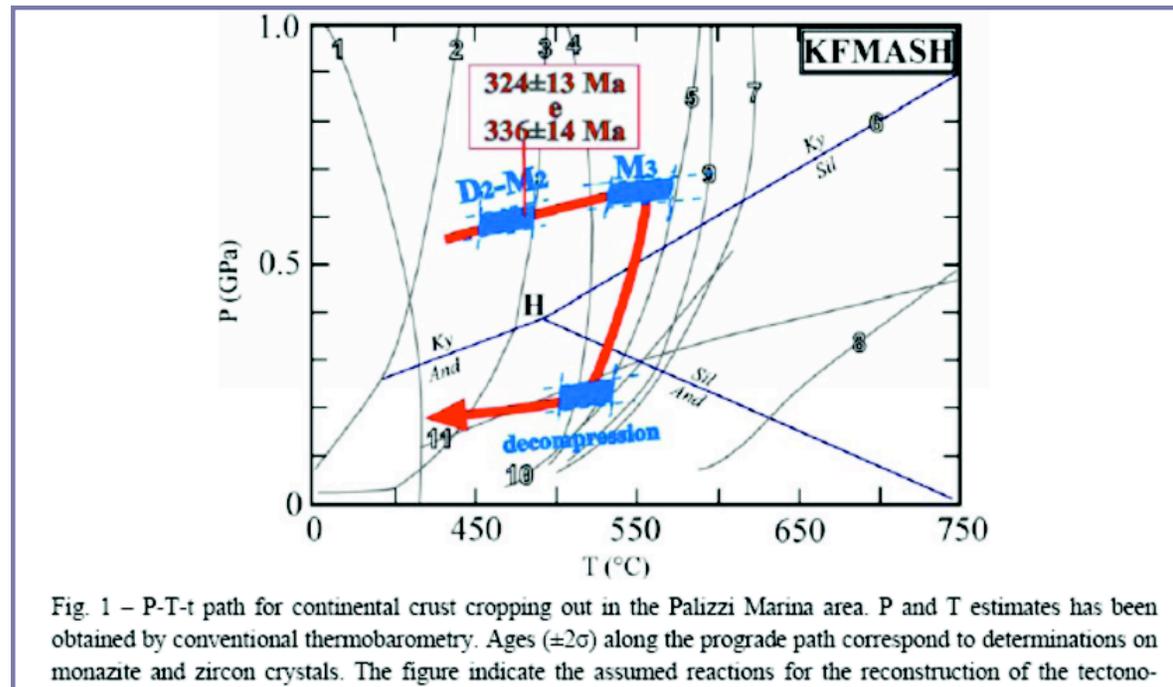


Schematic pseudosections for low temperature reactions in the system CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. Bulk composition (red dot in triangle) is near that of typical mantle peridotit

## Termobarometria convenzionale vs. pseudosezioni P-T

### Esempio di path P-T ricostruito con la termobarometria convenzionale

Tectono-metamorphic evolution of crystalline basement cropping out in the Palizzi Marina area (Aspromonte, Calabria). (A. Grande 2008, PhD Thesis. Università di Bari)



Valutazione delle condizioni di metamorfismo

Pseudosezioni P-T e traiettorie di evoluzione di un paragneiss (a sinistra) e di un micascisto (destra) del Complesso di Mandatoriccio (Massiccio della Sila, Calabria) (A. Langone (2008): PhD Thesis, Bologna)

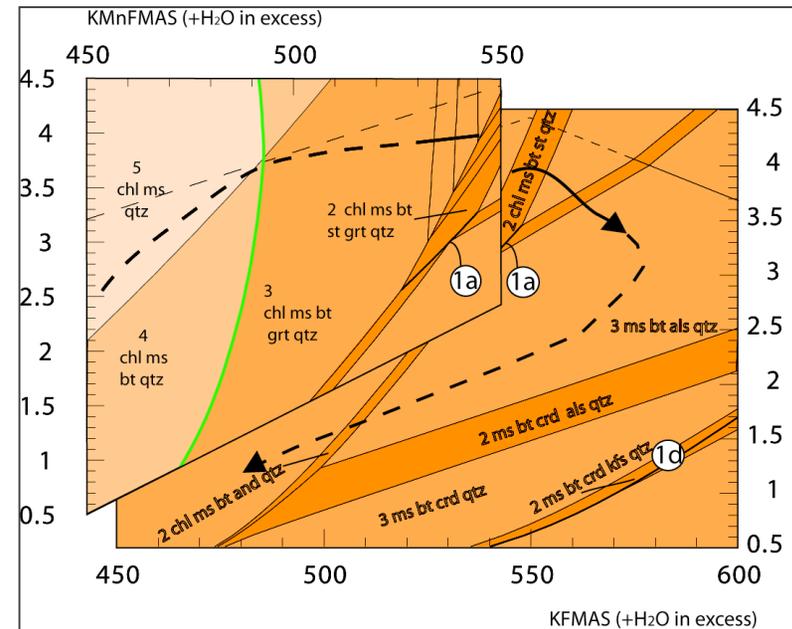
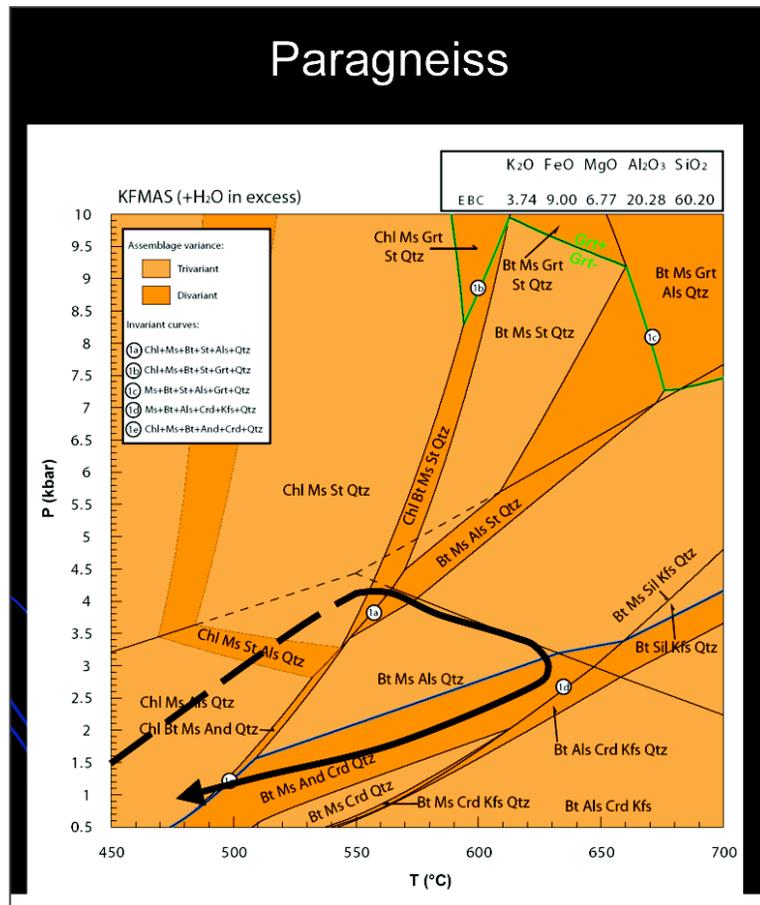


Fig. 6.1: particulars of KMnFMAS (Fig. 4.6) and KFMAS (Fig. 4.7) isochemical sections constructed for LL56a4 micascist illustrating P-T path. See Figures 4.6 and 4.7 for captions and text for explanations.

## Valutazione delle condizioni di metamorfismo

### Low-pressure metamorphism in the Hercynian intermediate/upper crust from Sila (Calabria, southern Italy): new insights from U-Th-Pb dating of zircon and monazite

(A. Langone, G. Godard, A. Caggianelli, G. Prosser, A. Rottura & M. Tiepolo ; *Rend. online Soc. Geol. It.*, 3, 2008, pp. 486-487

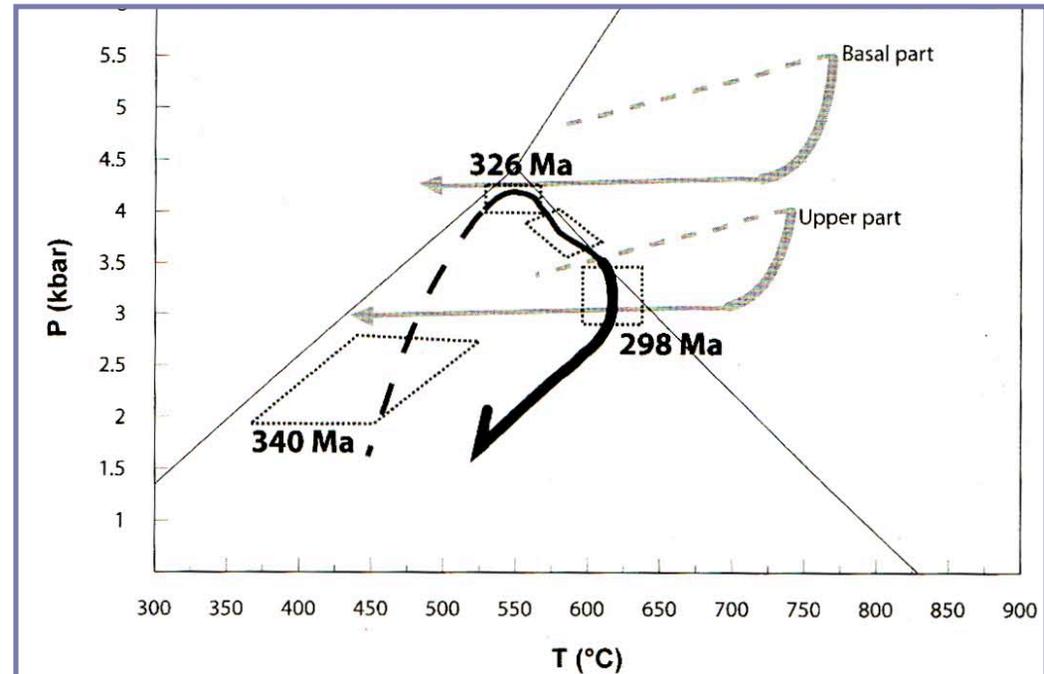


Fig. 2 – P-T paths of the Hercynian crustal levels exposed in Sila: intermediate-upper crust (black lines); basal and upper part of the lower crust (grey lines; GRAESSNER & SCHENK, 2001). Dotted perimeters represent the prograde metamorphic phases of the intermediate-upper crust. Thick segments of the P-T paths refer to the decompression event, coeval in the different crustal levels. See text for explanations. - percorsi P-T dei vari livelli crostali ercinici esposti in Sila: crosta intermedio-superiore (linee nere); parte basale e superiore della crosta inferiore (linee grigie; GRAESSNER & SCHENK, 2001). I perimetri puntinati rappresentano le fasi metamorfiche prograde della crosta intermedio-superiore. I segmenti spessi dei percorsi P-T si riferiscono all'evento decompressivo, coevo nei vari livelli crostali. Vedi testo.