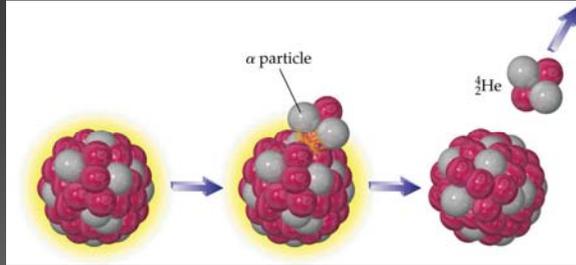




**IL METODO DELLE TRACCE DI
FISSIONE:
FONDAMENTI E LA TERMOCRONOLOGIA DI
BASSA TEMPERATURA**

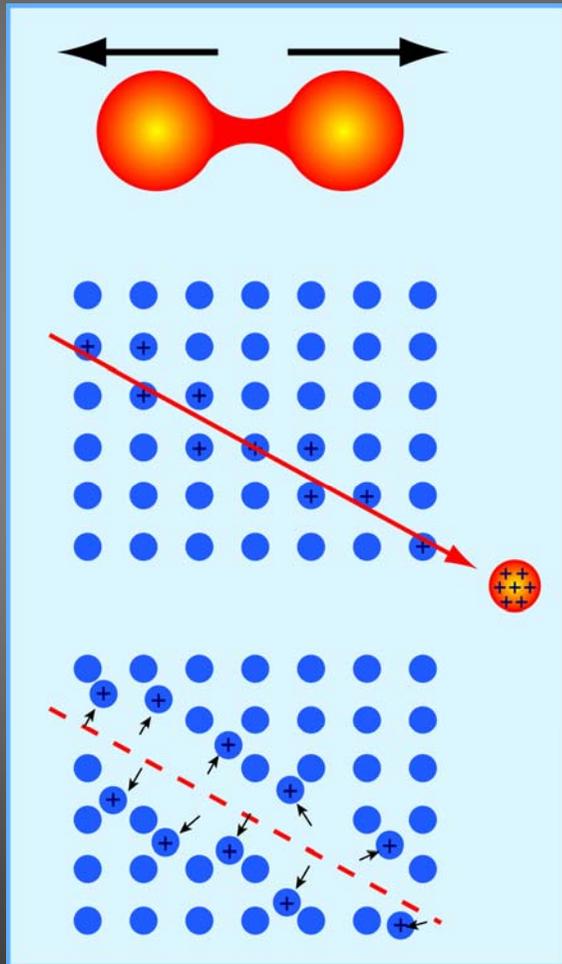
Maria Laura Balestrieri

C.N.R., Istituto di Geoscienze e Georisorse

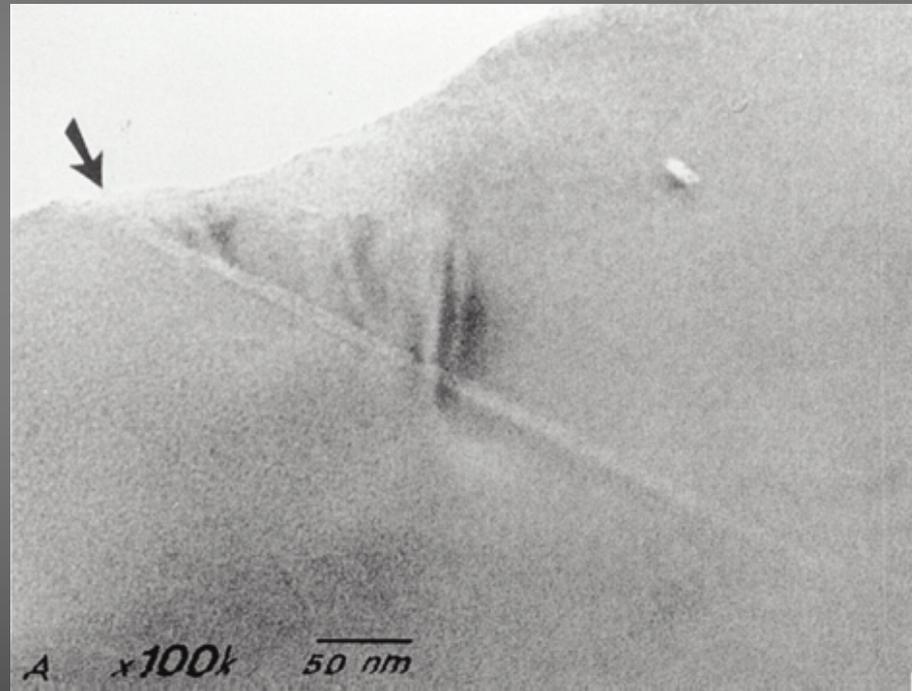


Decadimento radioattivo per emissione di particelle α

Processo di formazione delle tracce di fissione



TEM image of a latent track

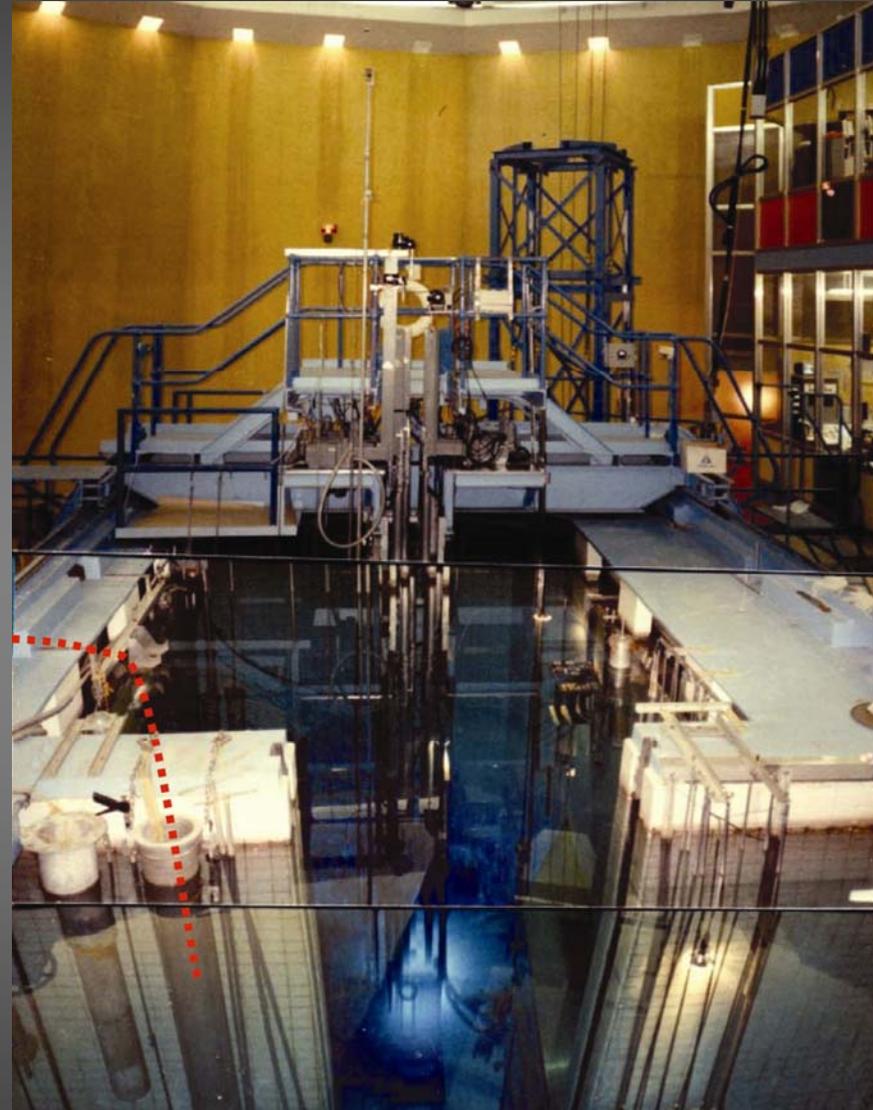


from Paul & Fitzgerald (1992)

EQUAZIONE DI ETA'

$$t = \frac{1}{\lambda_{\alpha}} \cdot \log \left[\left(\frac{\lambda_{\alpha}}{\lambda_f} \right) \cdot \left(\frac{N_s}{^{238}\text{N}} \right) + 1 \right]$$

Il contenuto di U presente in un campione può essere determinato irraggiando il campione con neutroni termici in un reattore nucleare. L'irraggiamento produce la fissione artificiale del ^{235}U il cui rapporto isotopico con ^{238}U è noto.



LENA Università di Pavia

$$t = \frac{1}{\lambda_{\alpha}} \log \left[\left(\frac{\lambda_{\alpha}}{\lambda_f} \right) \left(\frac{N_s}{N_i} \right) \cdot I \cdot \sigma \cdot \phi + 1 \right]$$

λ_{α} = costante di decadimento α

λ_f = costante di decadimento per fissione

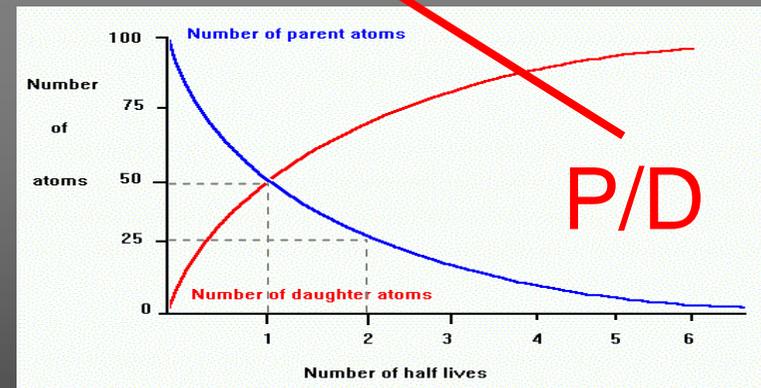
N_s = numero tracce spontanee

N_i = numero tracce indotte

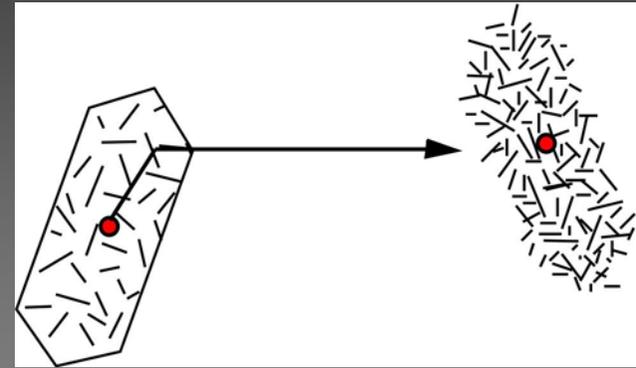
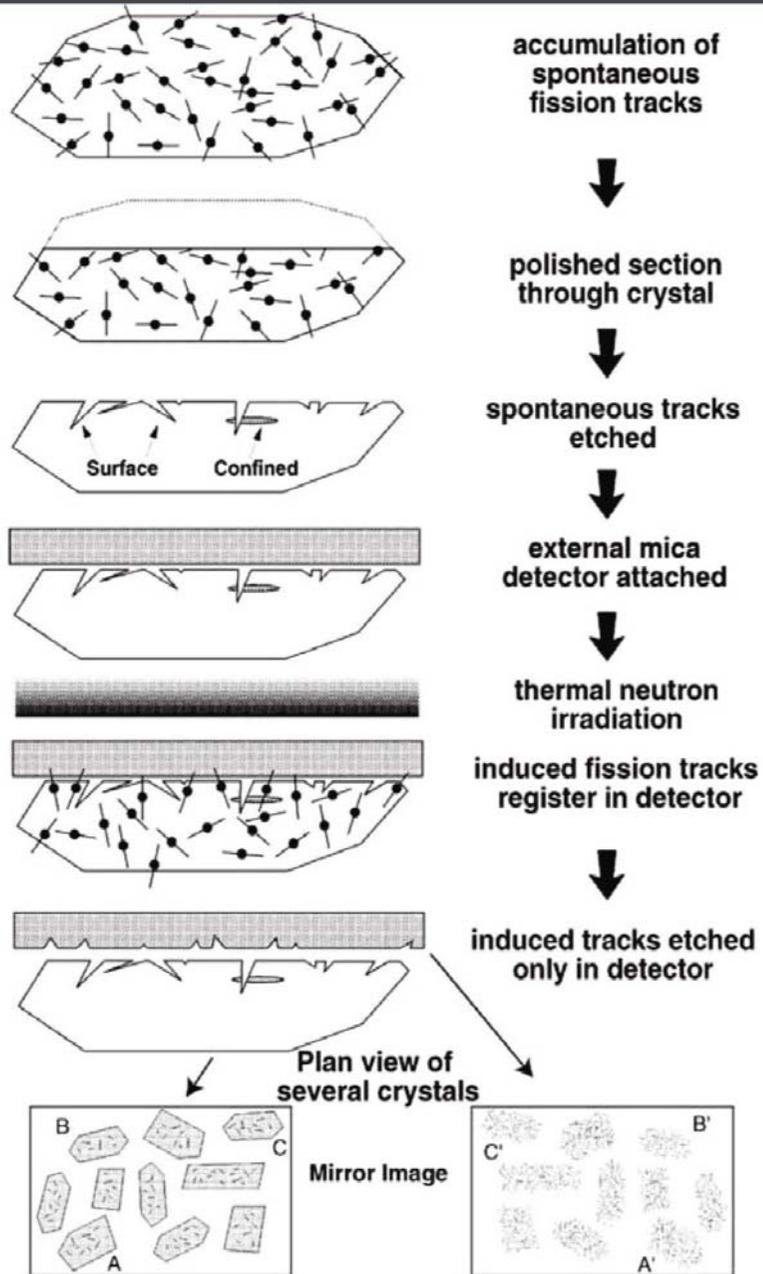
I = rapporto $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$

σ = sezione d'urto (probabilità per un atomo ^{235}U di assorbire un neutrone termico)

Φ = flusso di neutroni



External Detector method - EDM





S13P67.0140

File Edit View/Windows Stage Data Plug-Ins Commands Help Cursor Temporary

Command: - Current Mag.: 125.0 Stage Location: Undetermined

STAGE X = 0 Y = 0 Program Log Initialize new sample

Last Major Action: Opened slide file

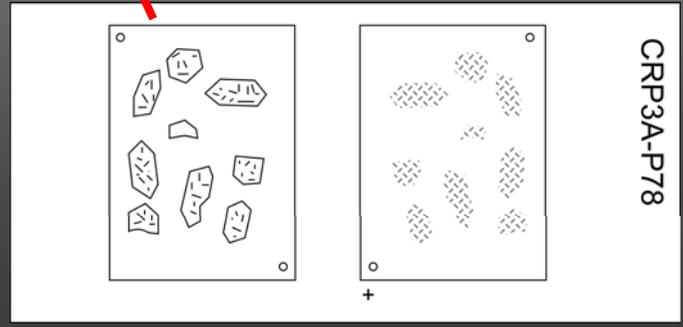
TABLET None

Current Grain: 0 Current Length: 0 Current Scan Pt: 0
 Total Grains: 30 Total Lengths: 25 Total Scan Pts: 0

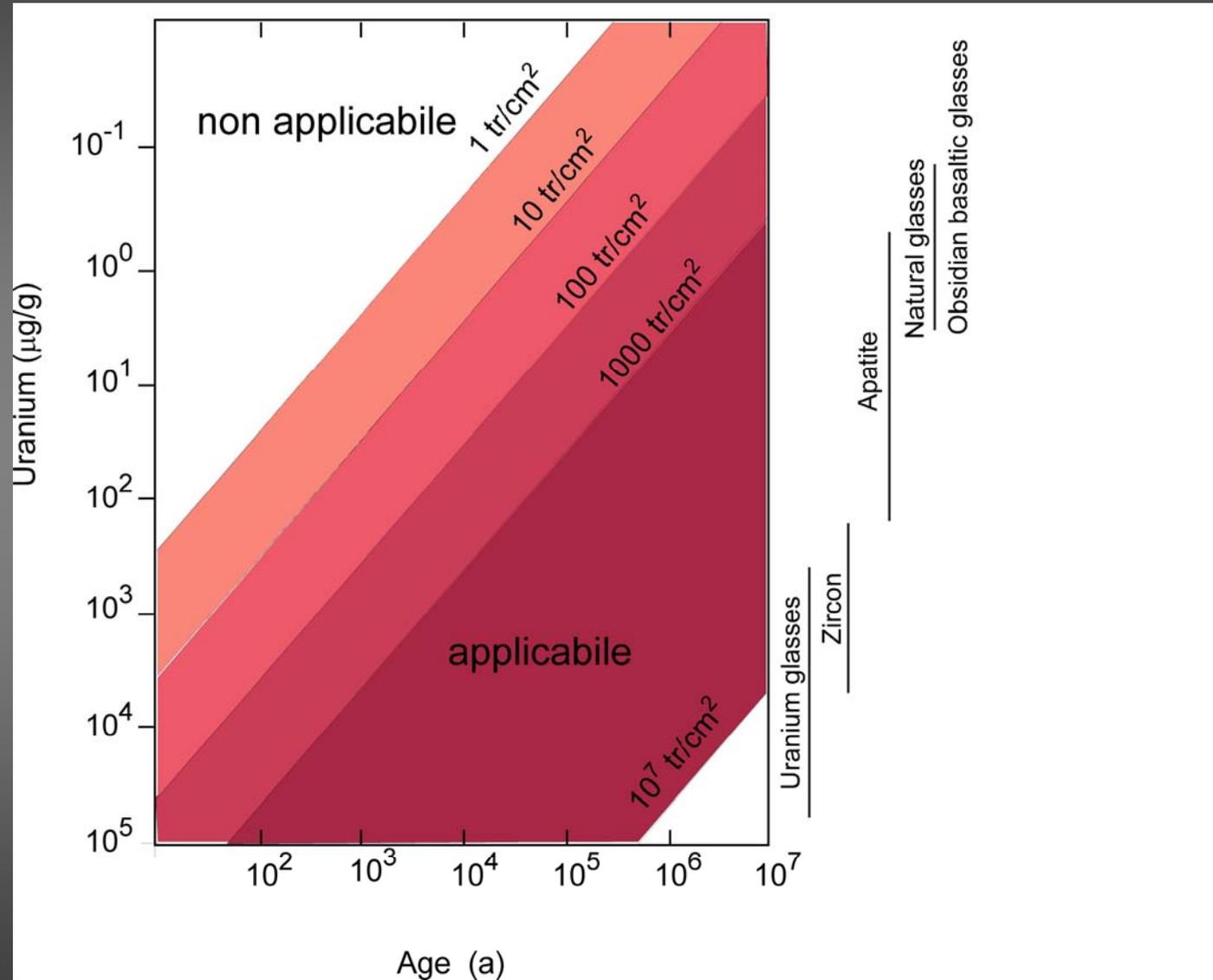
Orn#	ND	X	Y	Age	sfs	MDpr	NL	Notes	Len#	ND	X	Y	Len	OC	MDpr	T	vV	Orn#
1	3	50462	43420	0	0	1.43	0		1	2	54015	103857	10.73	80	1.29	R	-47	0
2	3	51006	85490	0	0	1.60	0		2	2	59387	88986	14.69	57	1.32	R	73	0
3	5	49491	93765	0	0	1.50	0		3	1	62093	71054	12.50	65	2.00	R	64	0
4	5	58398	118211	0	0	1.56	0		4	3	65045	91924	14.18	12	1.48	T	60	0
5	4	56655	114253	0	0	1.34	0		5	2	76785	63976	13.40	34	1.00	R	37	0
6	4	61472	114974	0	0	1.56	0		6	6	80015	123609	15.05	44	1.38	T	12	0
7	2	62230	114237	0	0	1.22	0		7	1	79538	43119	13.24	46	1.42	T	11	0
8	5	64283	100439	0	0	1.68	0		8	3	84778	69410	12.51	75	1.63	R	-70	0
9	5	62761	46057	0	0	1.61	0		9	4	87696	90894	12.08	45	1.42	R	83	0
10	4	73604	33154	0	0	1.48	0		10	5	93515	103477	14.19	35	1.71	R	34	0
11	3	82438	37517	0	0	1.51	0		11	2	100558	50010	13.91	18	1.12	R	15	0
12	5	81236	65628	0	0	1.57	0		12	4	105644	62155	14.54	46	1.55	R	-68	0
13	5	84516	109201	0	0	1.62	0		13	4	105533	61991	13.13	82	1.55	R	-16	0
14	5	87390	114453	0	0	1.58	0		14	2	107728	39609	13.55	39	1.43	T	80	0
15	3	97470	113666	0	0	1.85	0		15	0	112490	101897	14.39	16	---	R	-82	0
16	5	95781	98607	0	0	1.65	0		16	0	113423	99419	14.04	32	---	R	-33	0
17	3	102258	79679	0	0	1.45	0		17	3	117191	67313	12.81	72	1.55	R	65	0
18	3	82462	70183	0	0	1.22	0		18	3	124620	62463	13.26	41	1.70	R	67	0

Orn#	Df	X	Y	Dpar	Dppr	MDpr	MDDp	vV	Orn#	Df	X	Y	Dpar	Dppr	MDpr	MDDp	vV
1	1	50338	43149	1.11	0.50	1.43	0.70	15	1	1	54149	104009	1.05	0.56	1.29	0.60	61
1	4	50154	42537	1.67	0.87	---	---	22	1	2	54096	104108	1.52	0.64	---	---	67
1	3	50491	42752	1.52	0.73	---	---	20	2	1	59484	82114	1.36	0.95	1.32	0.78	4
2	1	50876	84871	1.41	0.45	1.60	0.54	-77	2	2	59462	89097	1.29	0.62	---	---	4
2	2	50836	84689	1.38	0.57	---	---	-72	3	1	62228	71278	2.00	0.61	2.00	0.61	-42
2	3	50627	85168	2.02	0.59	---	---	-66	4	1	65077	91978	1.24	0.50	1.48	0.41	90
3	1	49502	93094	1.57	0.76	1.50	0.74	27	4	2	65056	91916	1.57	0.33	---	---	-62
3	2	49147	93034	1.32	0.87	---	---	54	4	3	65026	91945	1.62	0.41	---	---	-74
3	3	49197	93018	1.41	0.70	---	---	39	5	1	76963	63929	1.86	0.82	1.80	0.74	-84

piatto motorizzato



Applicabilità del Metodo

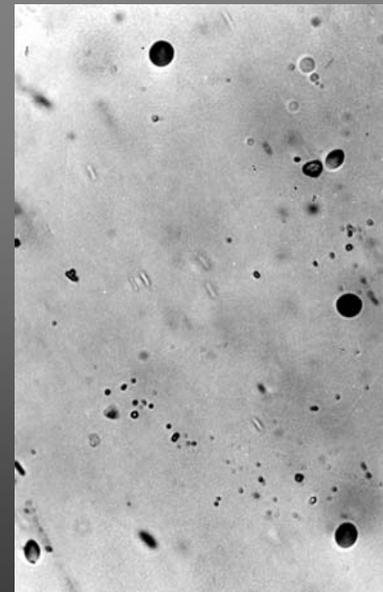


APATITE



VETRO

ZIRCONIUM

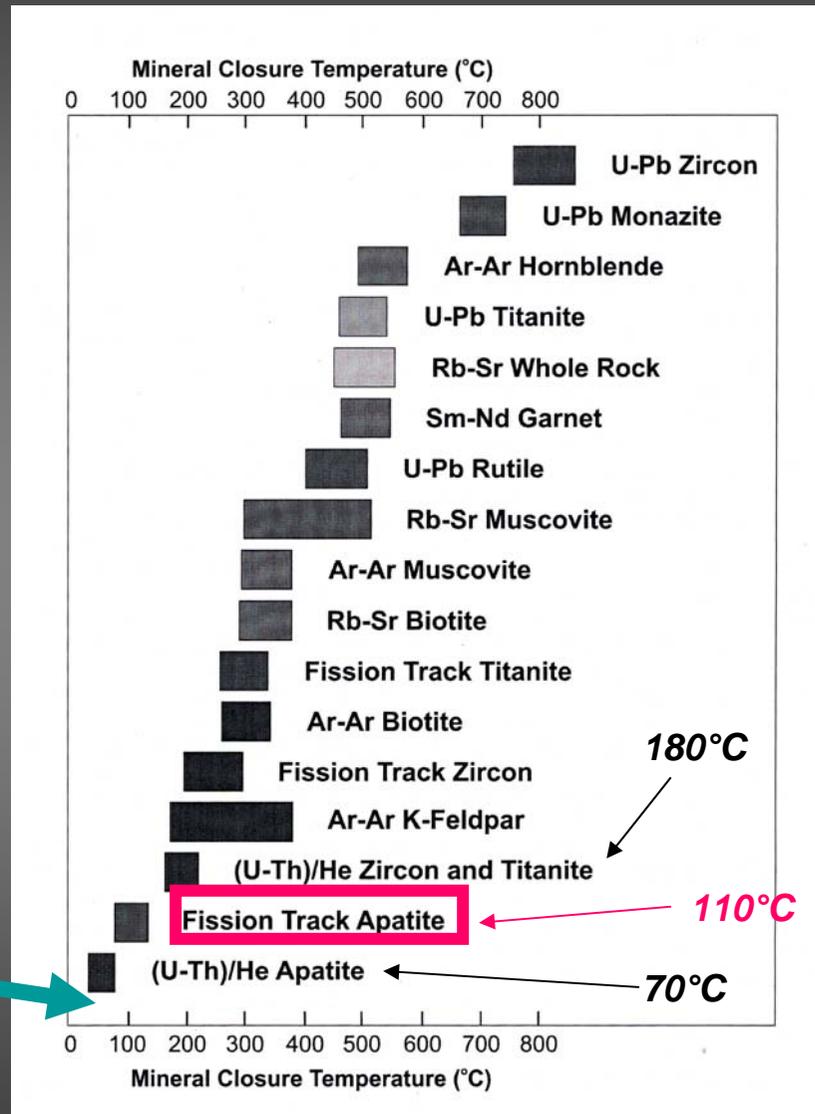


Temperatura di Chiusura

Temperatura del minerale datato al momento indicato dal termocronometro.

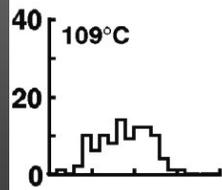
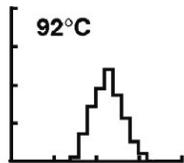
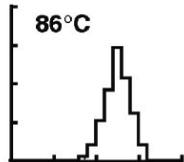
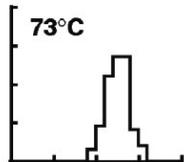
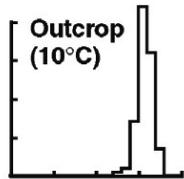
Temperatura della roccia alla sua età termocronologica di raffreddamento assumendo una storia di raffreddamento costante e monotono.

*Nuovo TERMOCRONOMETRO
basato sulla OSL: T_c 30°-35°C
Herman et al., 2010 EPSL 297, 183-189*



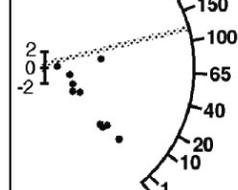
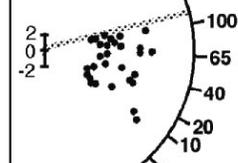
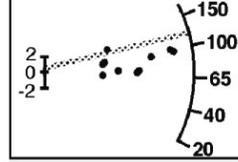
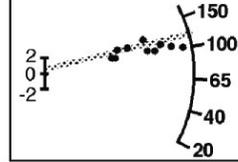
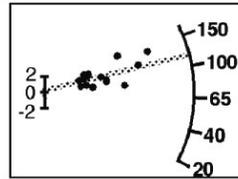
APATITE – Dati di POZZO

Track-Length Histograms



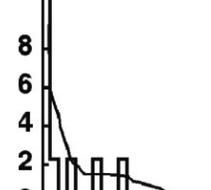
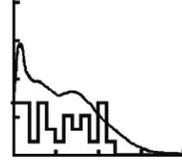
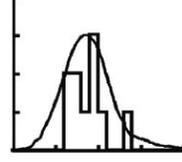
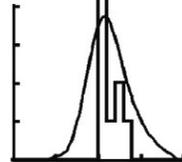
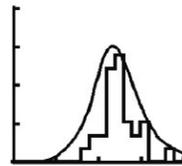
Track Length (μm)

Radial Plots of Single-Grain Ages



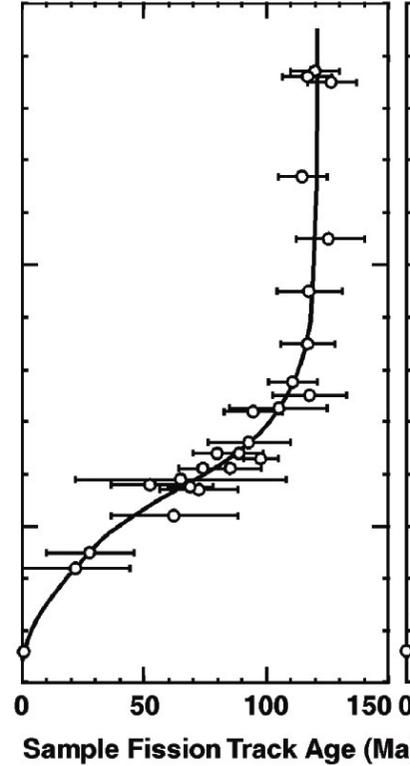
Precision Index

Histograms of Single-Grain Ages, with Age Spectra

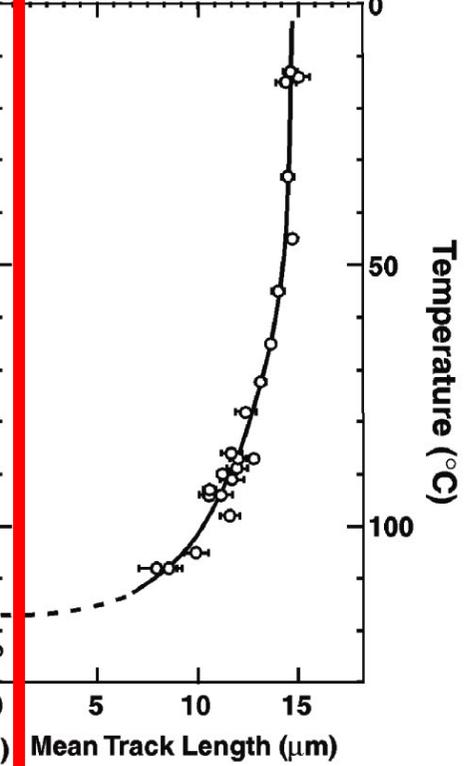


Single Grain Age (Ma)

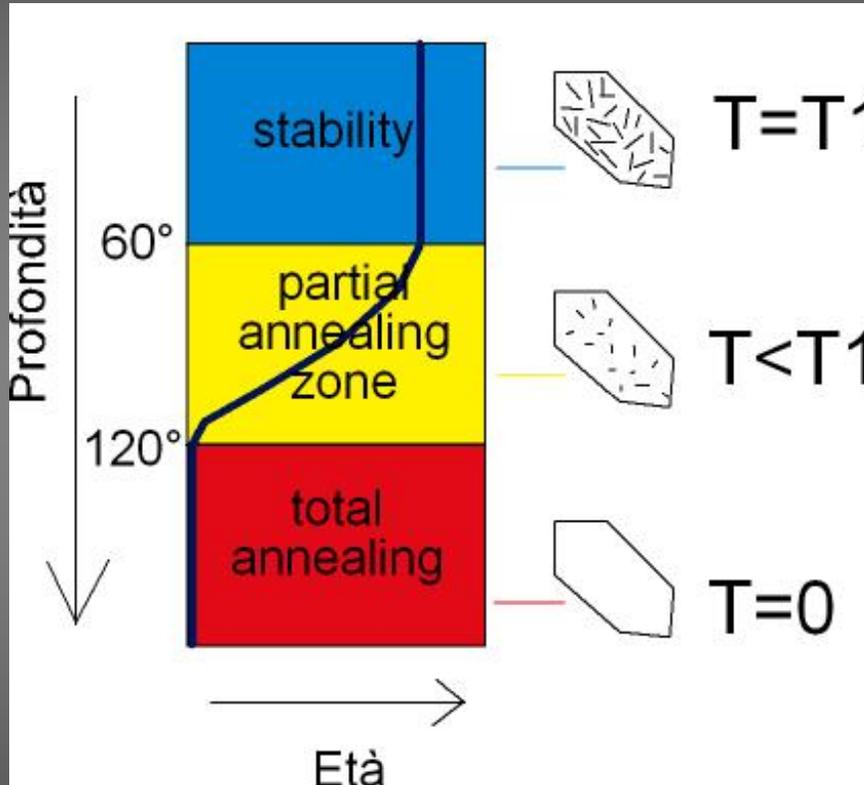
Mean Fission-Track Ages



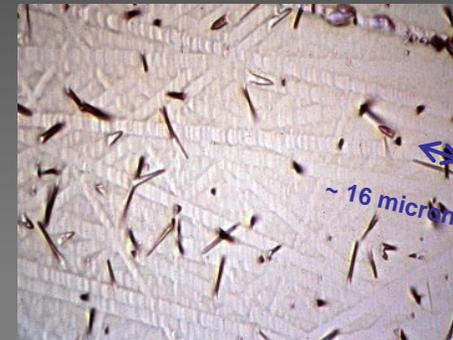
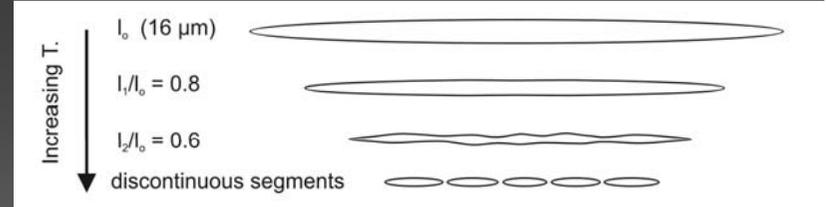
Mean Track Length



Partial Annealing Zone - PAZ



La PAZ dell'apatite si sovrappone alla finestra di generazione dell'olio



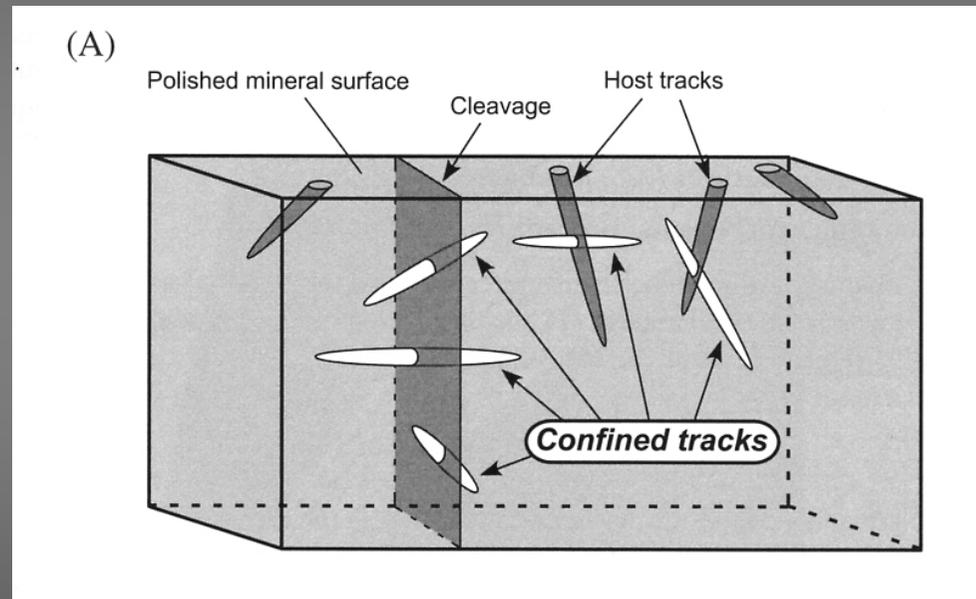
No annealing



LUNGHEZZA DELLE TRACCE DI FISSIONE



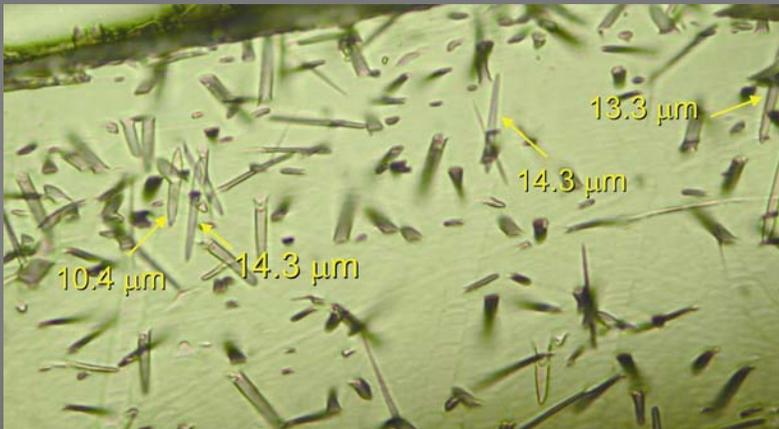
Tracce Confinare



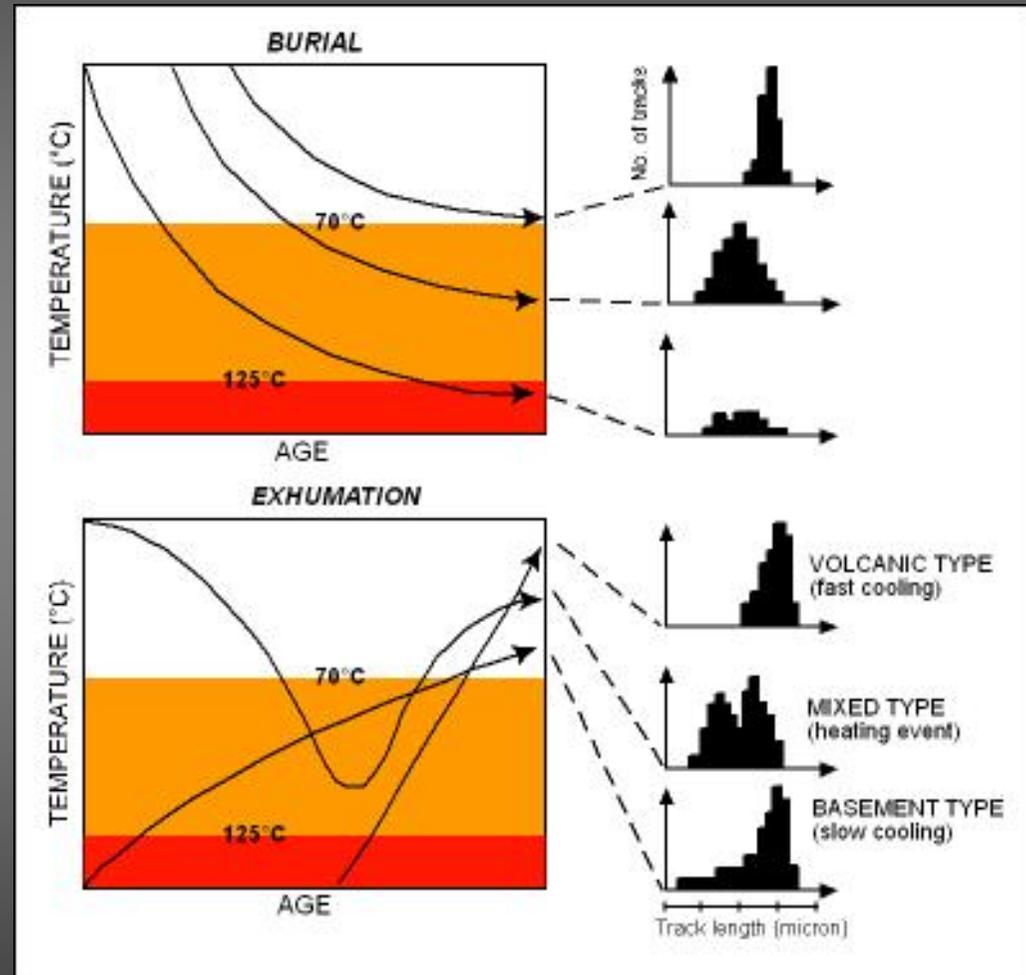
L iniziale nell'apatite ca. $16 \mu\text{m}$

Ricostruzione della Storia termica del campione dalla distribuzione delle lunghezze delle tracce

Le tracce si formano continuamente durante la storia di un campione



all'interno di un granello le tracce più corte sono più vecchie di quelle più lunghe

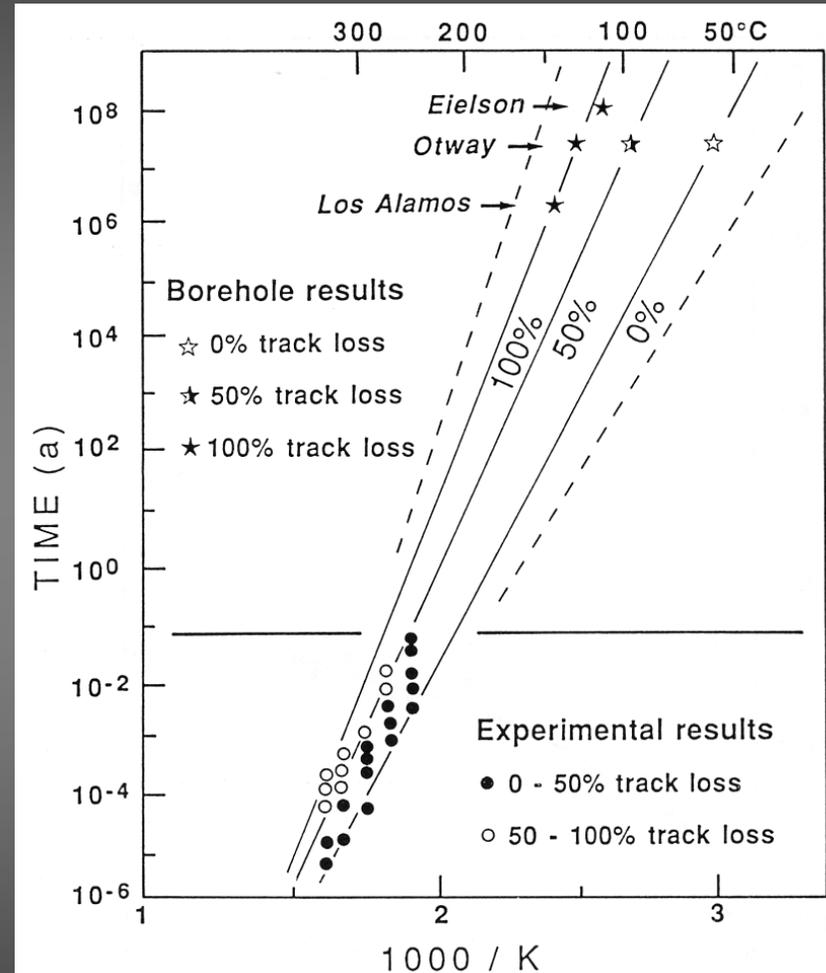


MODELLI DI ANNEALING

Descrizione matematica del raccorciamento delle tracce di fissione, basato su esperimenti di annealing in laboratorio.

Permettono di estrapolare i dati sperimentali da una scala tempo di laboratorio (<10 a) a tempi geologici (>1 Ma).

Le estrapolazioni / modelli sono testati e calibrati con dati geologici ben vincolati

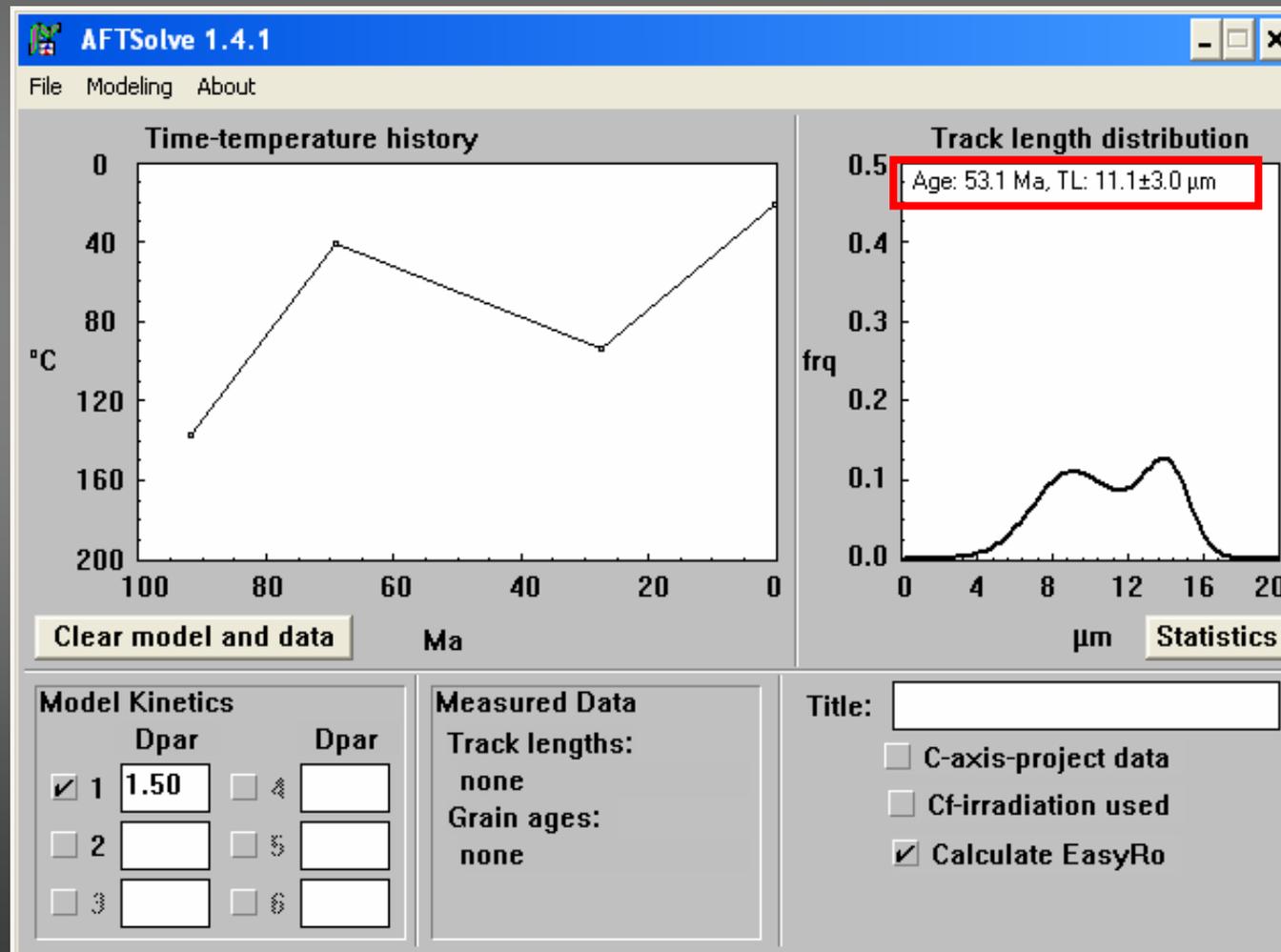


Plot di Arrhenius: descrive le relazioni tra il raccorciamento delle tracce, il tempo e la temperatura

MODELLING - AFTSolve

Forward modelling:

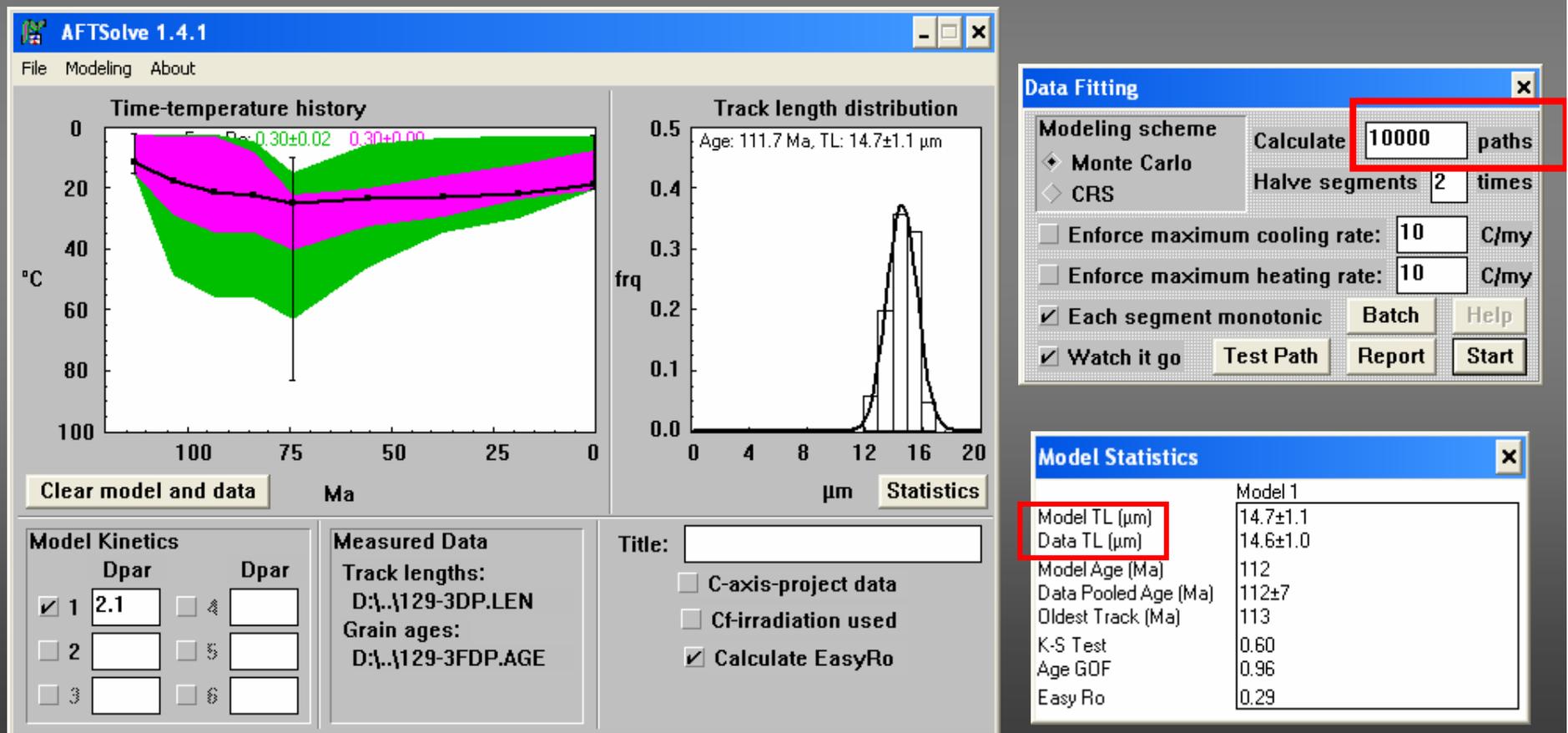
L'utilizzatore definisce un percorso Tempo-temperatura e il Software calcola l'età risultante, la lunghezza media e la distribuzione delle lunghezze delle tracce



MODELLING - AFT Solve

Inverse modelling:

L'utente stabilisce dei vincoli, il modello calcola un numero definito di percorsi di raffreddamento e li compara con i dati osservati, definisce degli involucri che raggruppano i percorsi che hanno un fit con i dati BUONO e ACCETTABILE

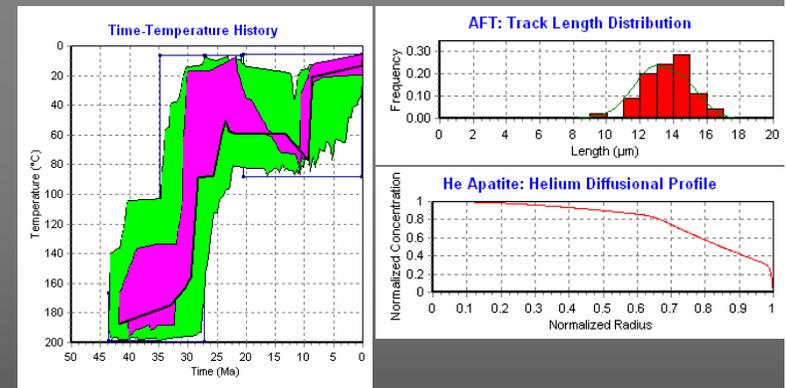


MODELLIZZAZIONE DELLE STORIE TERMICHE – Stabilire i vincoli

Quali informazioni ho a disposizione.....

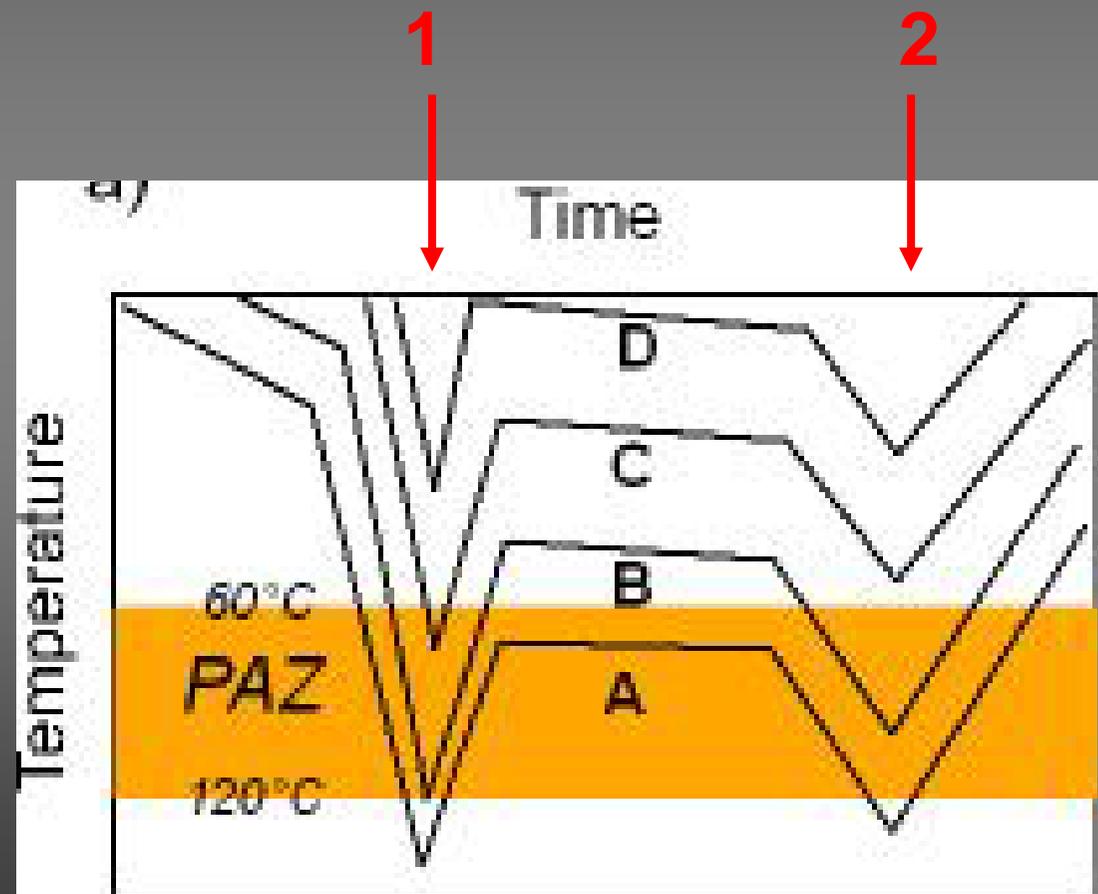
- Dalla sedimentologia: unconformity erosive, orizzonti alterati, suoli
- cineriti, orizzonti vulcanici
- altri termocronometri
- maturità termica, riflettanza della vitrinite,
- minerali argillosi

HeFTy, *Ketcham 2005*



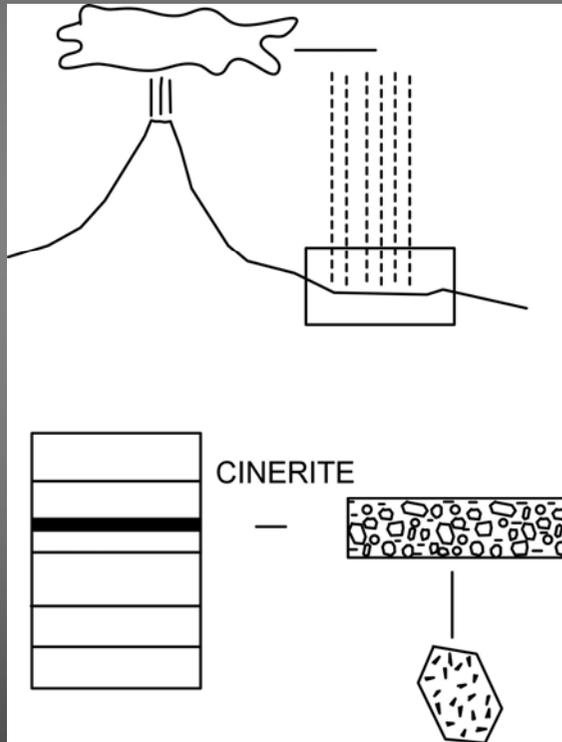
INTEGRAZIONE CON ALTRI INDICATORI TERMICI NELL'ANALISI DELLE SUCCESSIONI SEDIMENTARIE

-Indicatori termici irreversibili (Riflettanza Vitrinite e minerali argillosi)

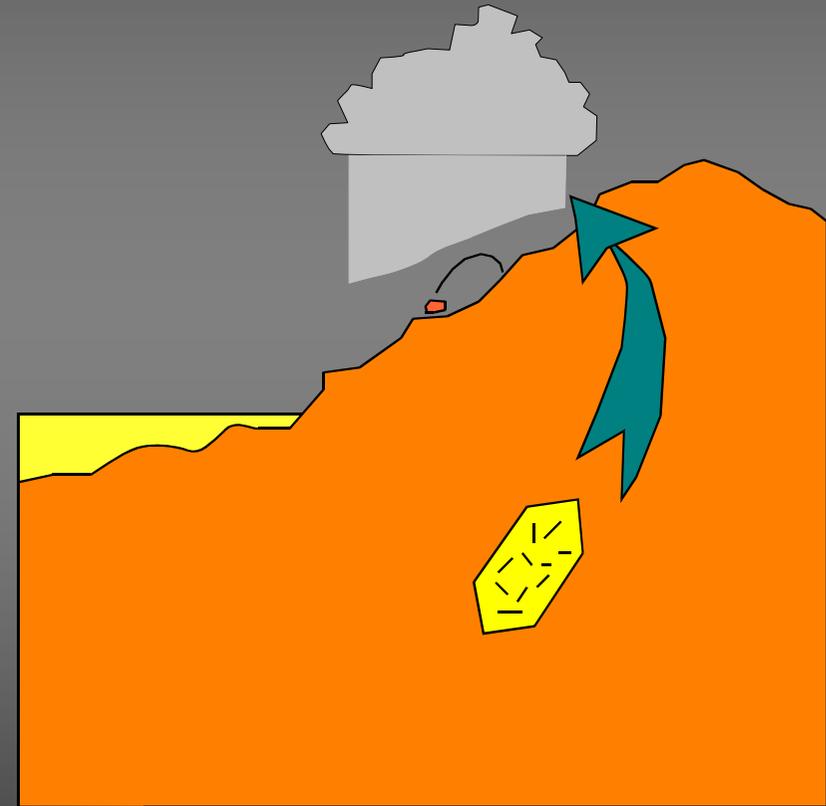


APPLICAZIONI

DATAZIONE



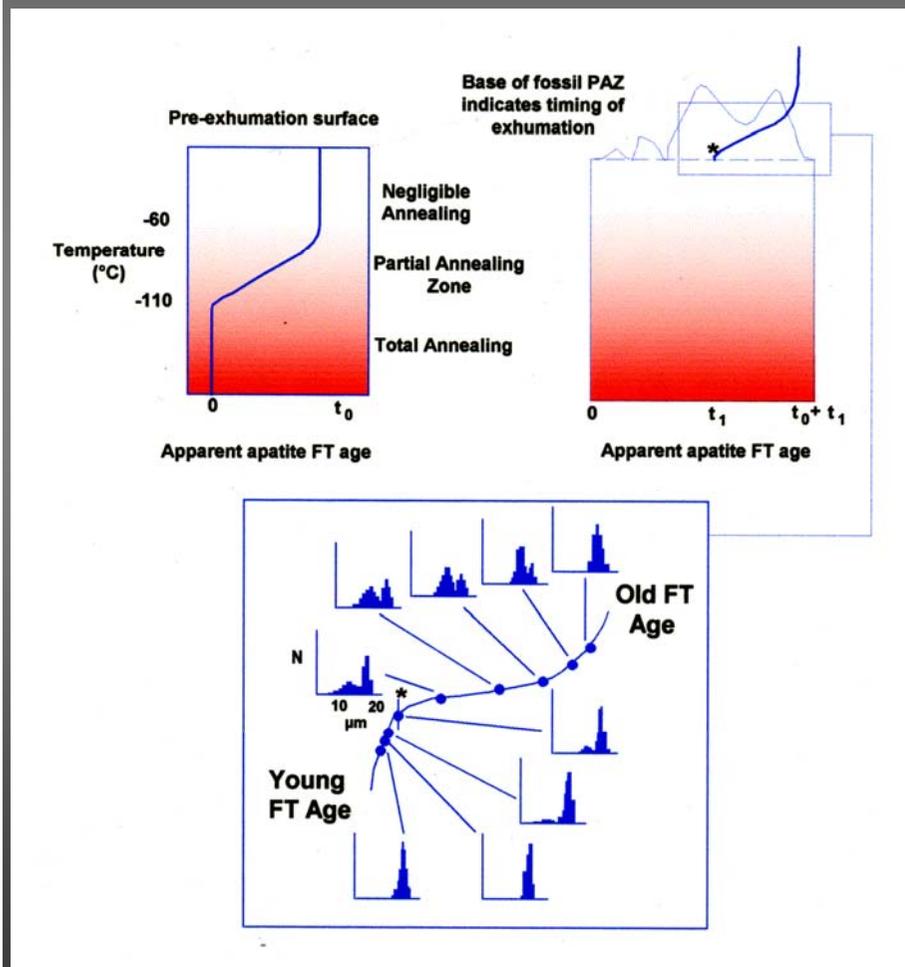
TERMOCRONOLOGIA: STUDI TETTONICI E GEOMORFOLOGICI



ESUMAZIONE

L'Esunzione è il movimento verso l'alto delle rocce rispetto alla superficie terrestre. E' il prodotto di EROSIONE e/o DENUDAMENTO TETTONICO

Una strategia frequentemente utilizzata è eseguire un campionamento lungo profili verticali



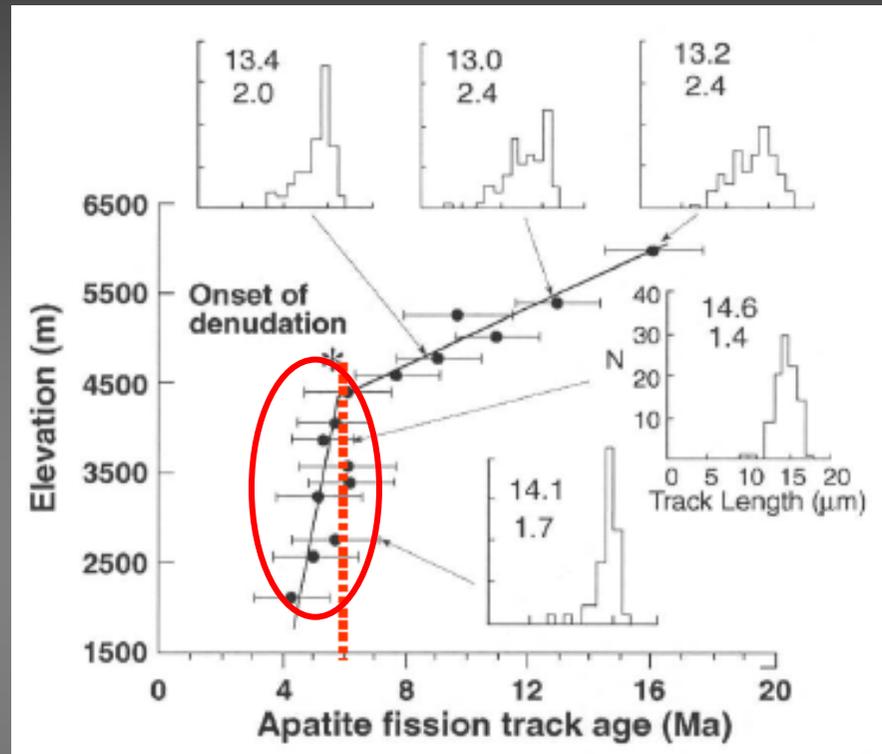
La *break in slopes* è interpretata come la base di una paleo-PAZ esumata [Gleadow and Fitzgerald 1987; Fitzgerald and Gleadow, 1990].

La *break in slope* definisce la transizione tra un periodo caratterizzato da relativa stabilità termica e tettonica ad un periodo di rapido raffreddamento dovuto ad esumazione.

I campioni al di sopra della *break in slope* mostrano una distribuzione delle lunghezze delle tracce confinate con un raccorciamento significativo e una deviazione standard ampia in quanto composta da tracce formatesi nella PAZ prima dell'esumazione e da tracce formatesi dopo l'esumazione.

Le distribuzioni delle lunghezze delle tracce al di sotto della *break in slope* riflettono un raffreddamento rapido (lunghezza media $>14 \mu\text{m}$, standard deviation $< 1.6 \mu\text{m}$; Fitzgerald et al., 1995).

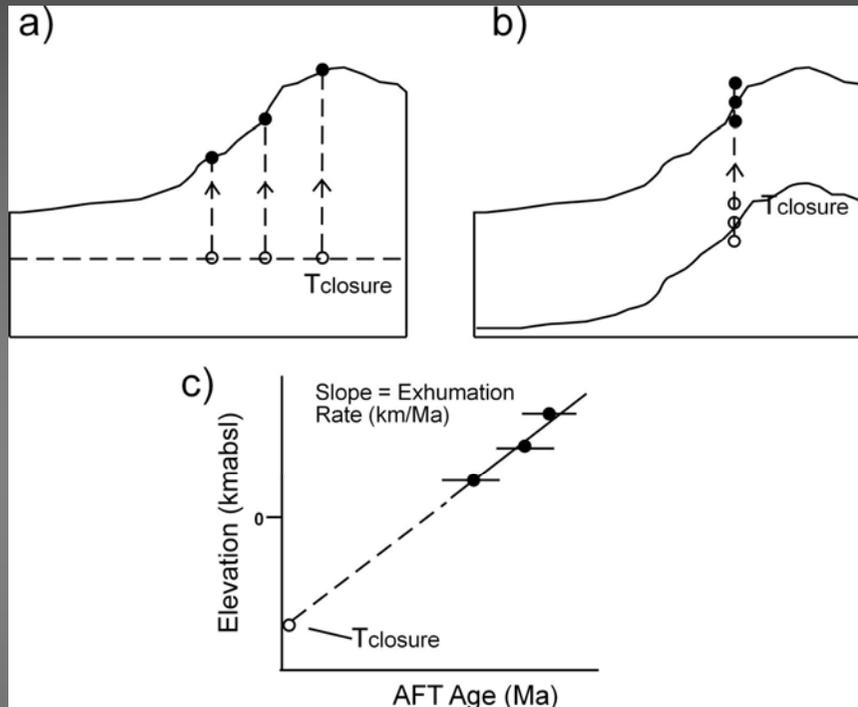
ESUMAZIONE – Profili Età-Quota



Età corrispondente alla break-in-slope in un profilo età-quota è l'età dell'inizio di una fase di denudamento

Il coefficiente angolare della retta di regressione dei campioni al di sotto della break in slope fornisce una stima del tasso di denudamento

L'assunzione è che tutti i campioni passino attraverso la temperatura di chiusura alla stessa quota.



(a) Modello delle isoterme orizzontali

Assume che la temperatura di chiusura è localizzata ad una quota costante rispetto al livello del mare.

I campioni possono essere raccolti da qualsiasi parte nella topografia.

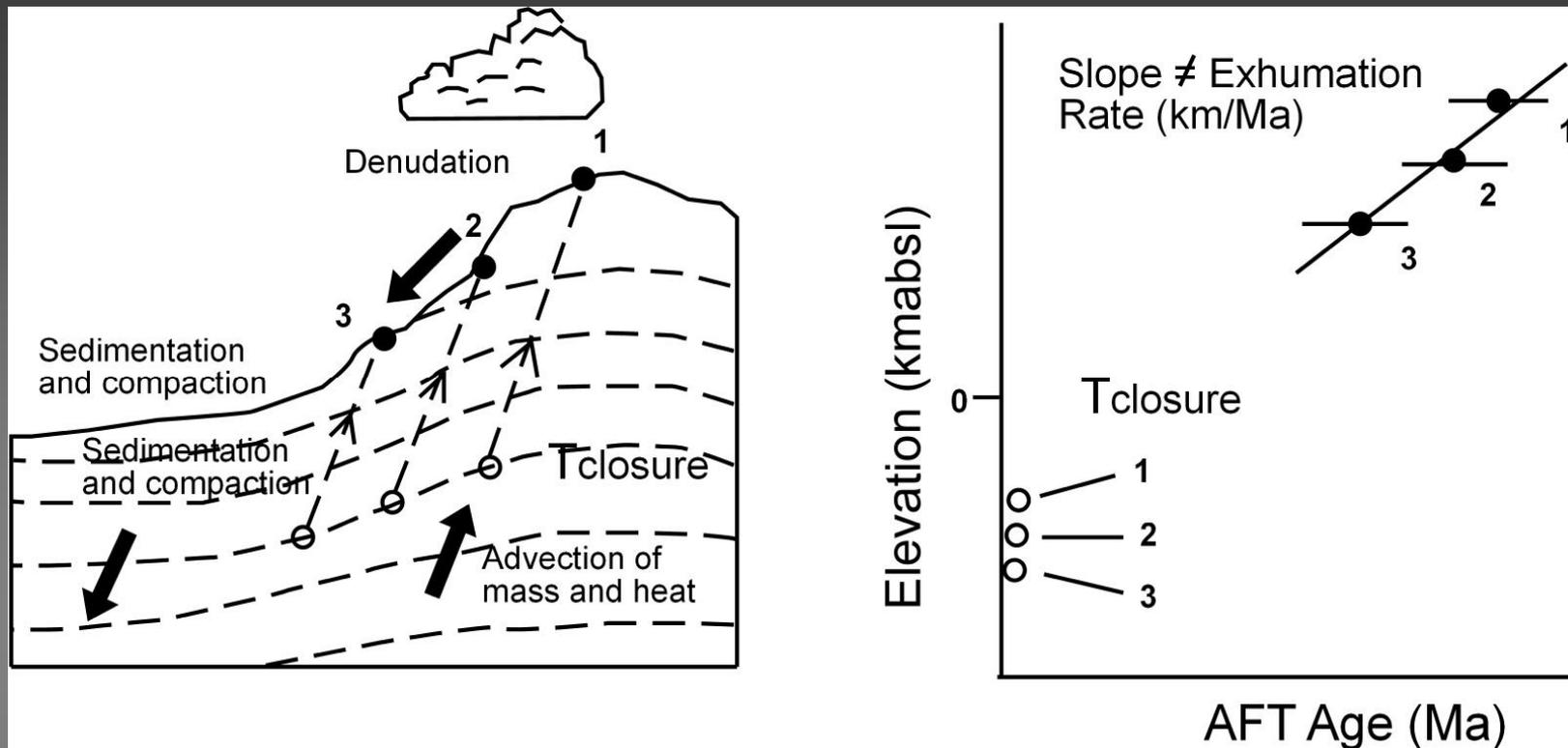
Questo modello è applicabile in regioni con una lunghezza d'onda corta (< ca. 10 km) e un tasso di erosione basso.

(b) Assume che l'isoterma ricalca la topografia

La temperatura di chiusura si trova ad una profondità costante sotto alla superficie.

I campioni devono essere raccolti lungo un profilo puramente verticale.

Questo modello è applicabile in regioni con un'ampia lunghezza d'onda (> 40 km) e un tasso di erosione alto.

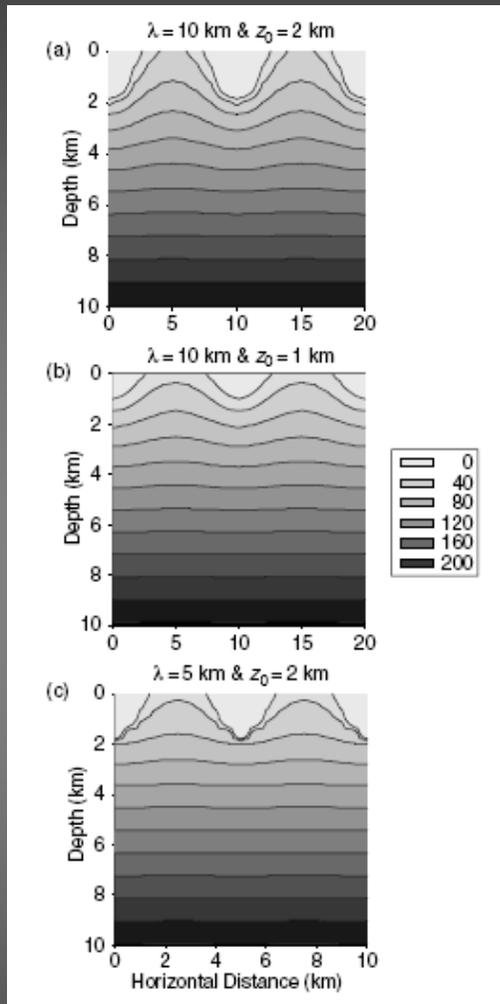


Modelli più realistici dove la profondità della temperature di chiusura e il gradiente termico variano nello spazio.

Processi che possono influenzare la profondità della temperatura di chiusura:

- 1) Flusso di calore laterale attraverso le faglie
- 2) sollevamento ed erosione
- 3) sedimentazione e seppellimento
- 4) variazione della temperatura in 3 D dovuto ad una topografia rilevata
- 5) magmatismo coevo con l'esumazione del campione

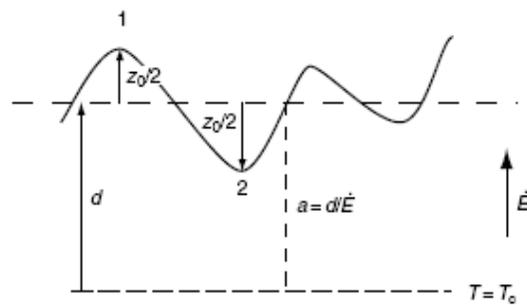
EFFETTO DELLA TOPOGRAFIA



Braun et al., 2006

Tassi di esumazione

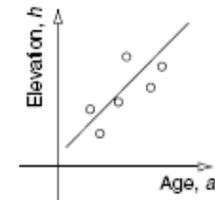
(a) High- T_c thermochronometry



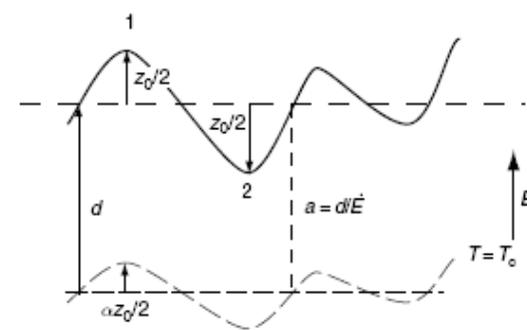
$$\frac{dh}{da} = \frac{Dh}{Da} = z_0/(a_1 - a_2)$$

$$a_1 = a + z_0/2/\dot{\epsilon} \ \& \ a_2 = a - z_0/2/\dot{\epsilon}$$

hence, $dh/da = \dot{\epsilon}$



(b) Low- T_c thermochronometry



$$\frac{dh}{da} = \frac{Dh}{Da} = z_0/(a_1 - a_2)$$

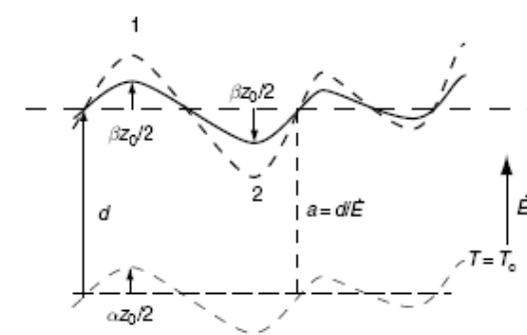
$$a_1 = a + z_0(1 - \alpha)/2/\dot{\epsilon}$$

$$a_2 = a - z_0(1 - \alpha)/2/\dot{\epsilon}$$

hence, $dh/da = \dot{\epsilon}(1 - \alpha)$



(c) Low- T_c thermochronometry + Relief change

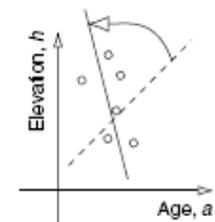


$$\frac{dh}{da} = \frac{Dh}{Da} = \beta z_0/(a_1 - a_2)$$

$$a_1 = a + z_0(\beta - \alpha)/2/\dot{\epsilon}$$

$$a_2 = a - z_0(\beta - \alpha)/2/\dot{\epsilon}$$

hence, $dh/da = \beta \dot{\epsilon}/(\beta - \alpha)$



AMBIENTI ESTENSIONALI

FAGLIE NORMALI

Il modo più diretto di determinare quando una faglia normale è stata attiva è datare livelli marker stratigrafici o intrusivi/estrusivi che possano delimitarne il momento di inizio, durata e i tassi.

Le FAGLIE NORMALI rappresentano un meccanismo efficace per esumare rocce da livelli crostali considerevolmente profondi e persino dal mantello.

La termocronologia di bassa temperatura costituisce un approccio alternativo che permette di datare direttamente il raffreddamento per esumazione delle rocce del footwall.

Grandi sistemi di faglie estensionali giustappongono rocce milonitiche medio-crostaali a rocce fragili e superficiali dello hangingwall.

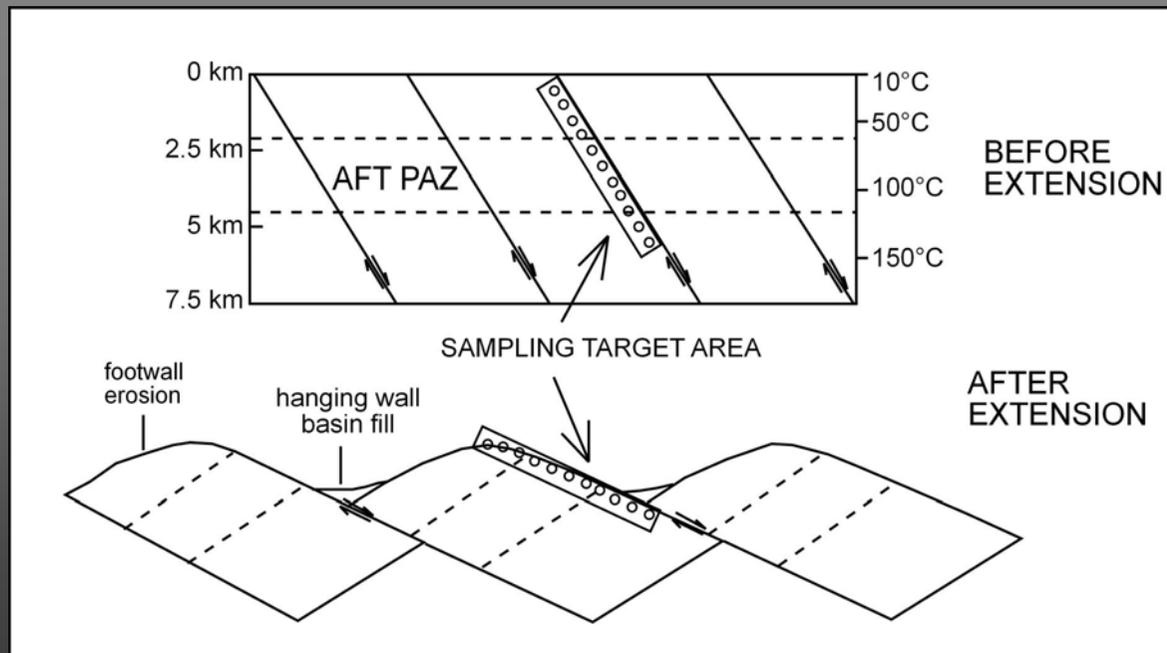
Le rocce del footwall si muovono relativamente verso l'alto durante il dislocamento delle faglie normali e provocano l'esumazione e il raffreddamento del footwall. Quindi, il "tempo" dell'attività della faglia può essere stimata da questo raffreddamento.

Questo approccio si può applicare solo nel caso che l'esumazione sia stata sufficiente da portare in superficie rocce che si trovavano a profondità e quindi temperature al di sopra della temperatura di chiusura del sistema.

FAGLIE ESTENSIONALI

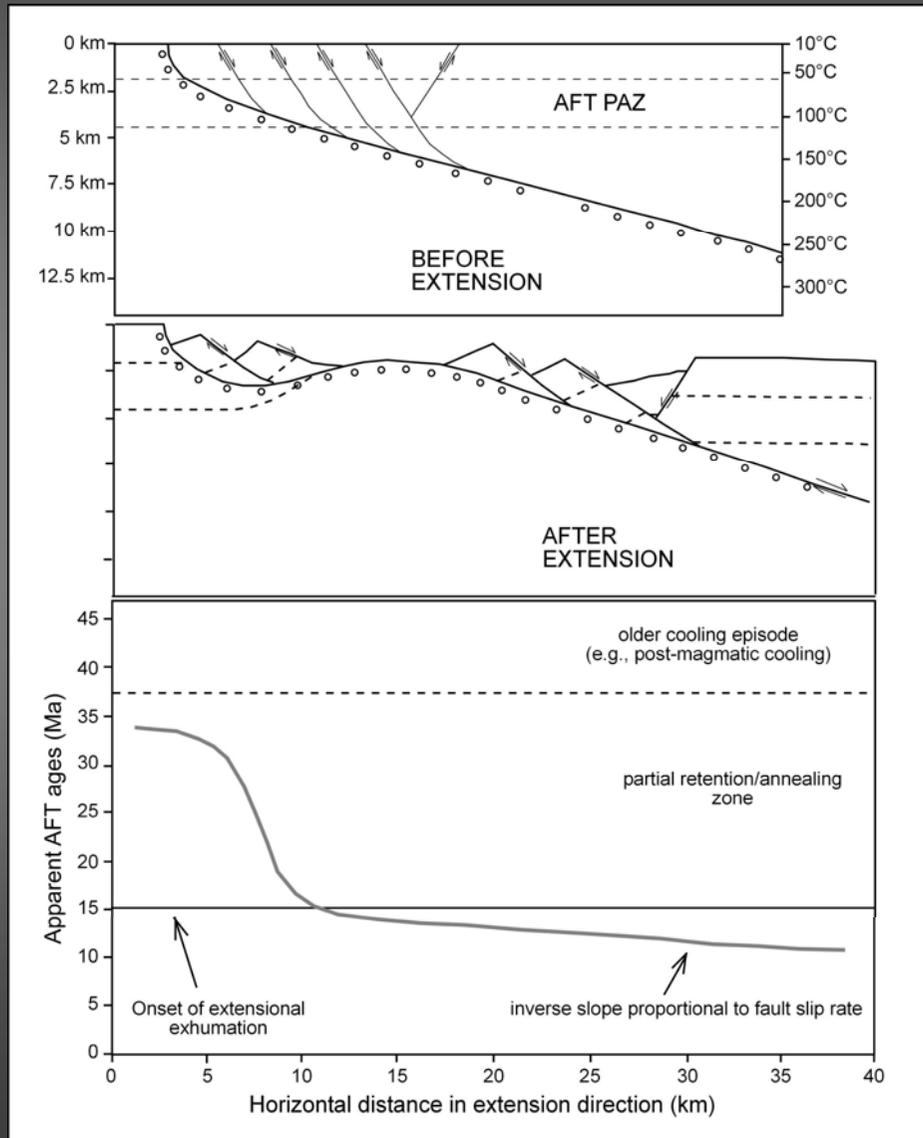
1) Faglie ad alto angolo

2) Detachment



La strategia è quella di analizzare campioni provenienti dalle massime paleo-profondità esposte nel footwall.

Nel caso delle faglie a basso angolo, i campioni vengono raccolti lungo dei transetti quasi-orizzontali paralleli alla direzione di scivolamento.



Per i core-complex metamorfici e i detachment, le età vengono plottate rispetto alla distanza dell direzione dello scivolamento.

Le età al di sotto del punto di inflessione tendono ad essere via via più giovani nella direzione di scorrimento come risultato della esumazione progressiva.

Il coefficiente angolare della retta di regressione dei campioni al di sotto del punto di inflessione dà una stima dello slip rate.

E' un altro modo di guardare una paleo-PAZ

ESUMAZIONE – Profili Età-quota

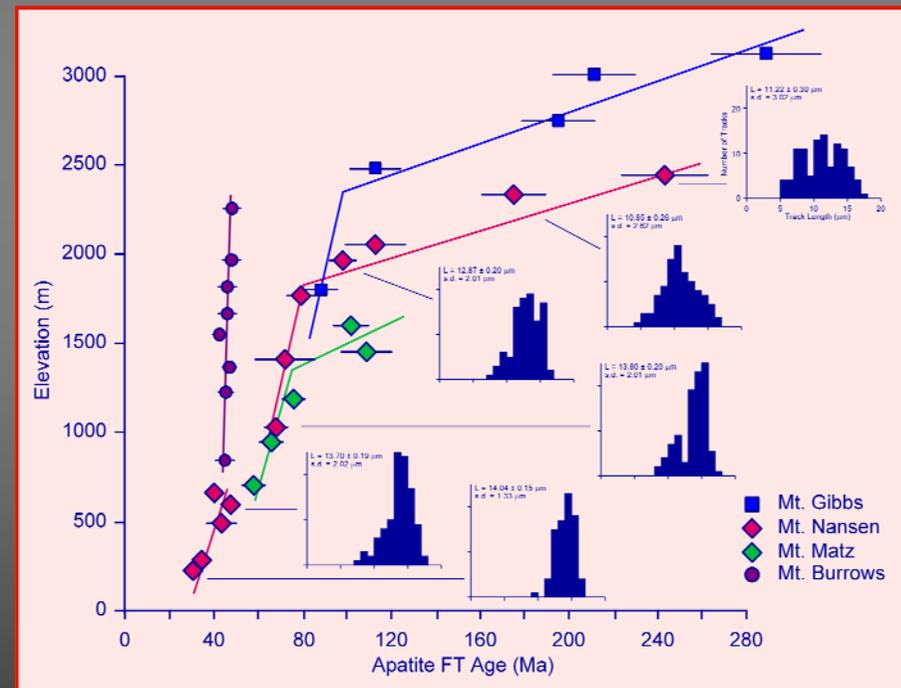
TERRA VITTORIA SETTENTRIONALE (ANTARTIDE)



In Terra Vittoria l'evoluzione post-Giurassica non è registrata da nessun marker stratigrafico o petrografico e quindi la sua ricostruzione è basata su metodi indiretti principalmente sulle tracce di fissione in apatite

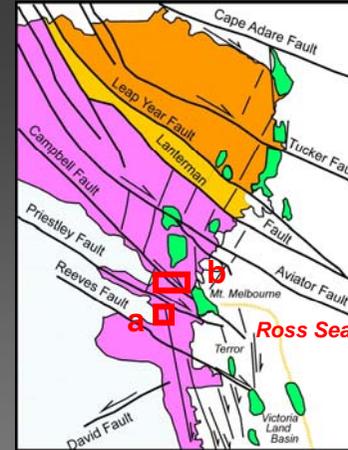
3

- Cretaceo Inferiore
- Tardo Cretaceo
- Eocene

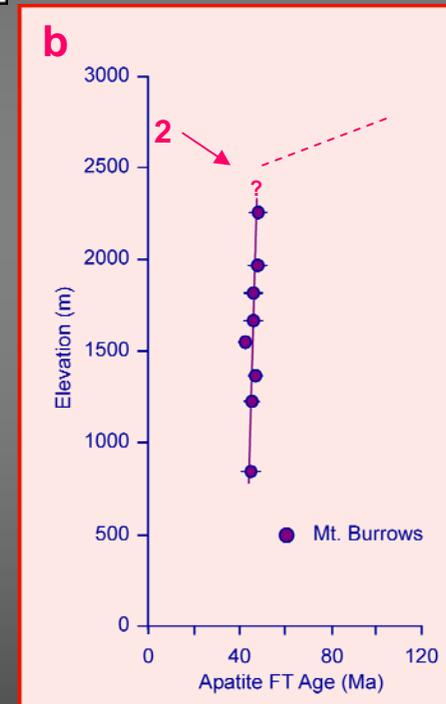
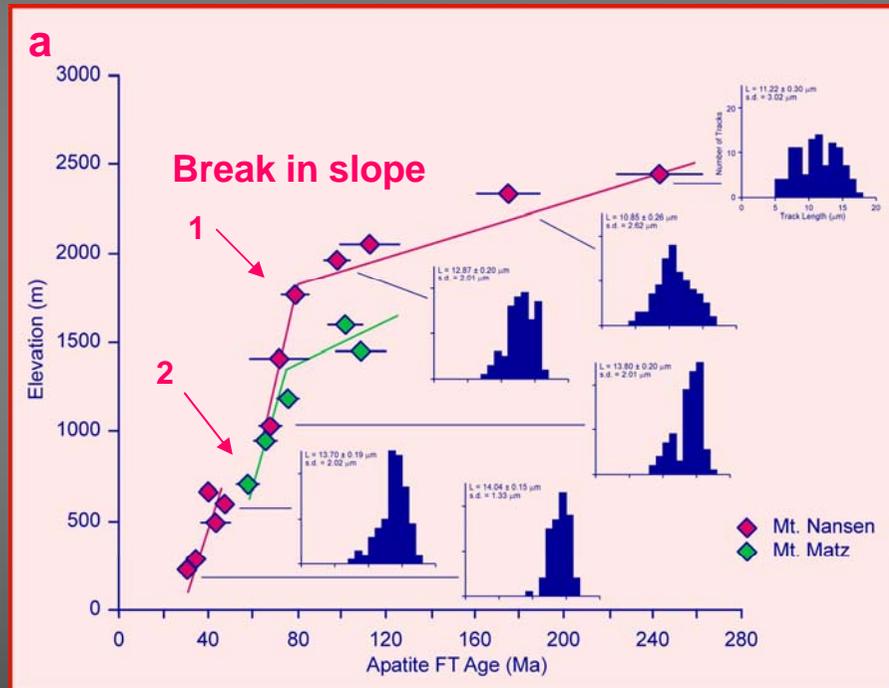


Balestrieri et al., 1998

Mt. Nansen



Mt. Burrows

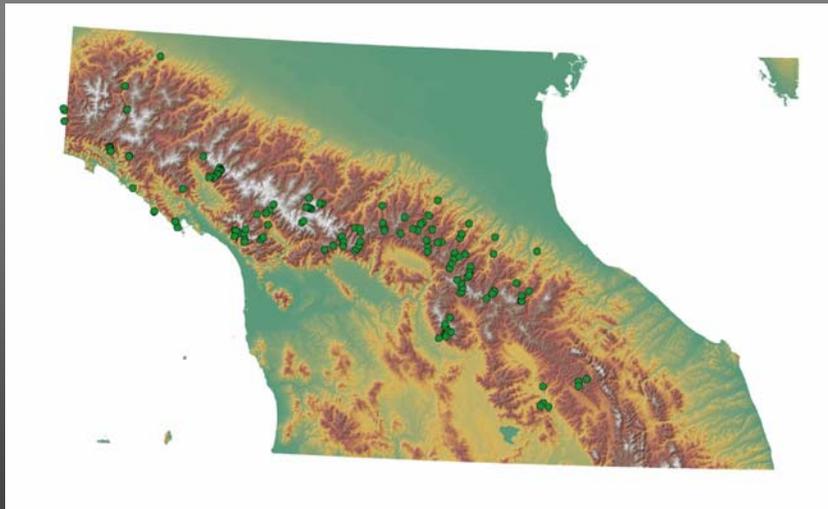
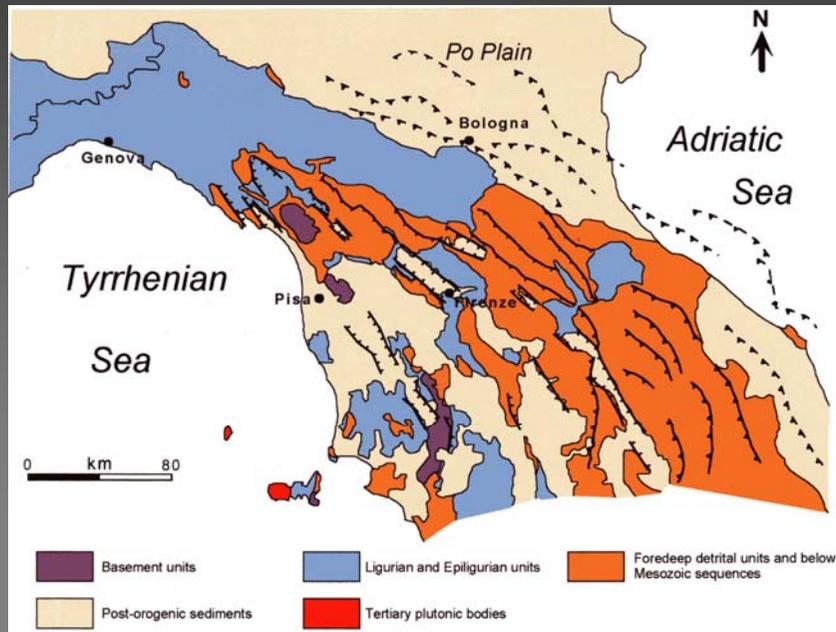


2 Fasi denudamento:

- 1) Tardo Cretaceo ca. 80 Ma
- 2) Eocene ca. 50 Ma

Rigetto verticale della Priestley fault tra Mt. Nansen and Mt. Burrows >1800m

APPENNINO SETTENTRIONALE



Liguridi:

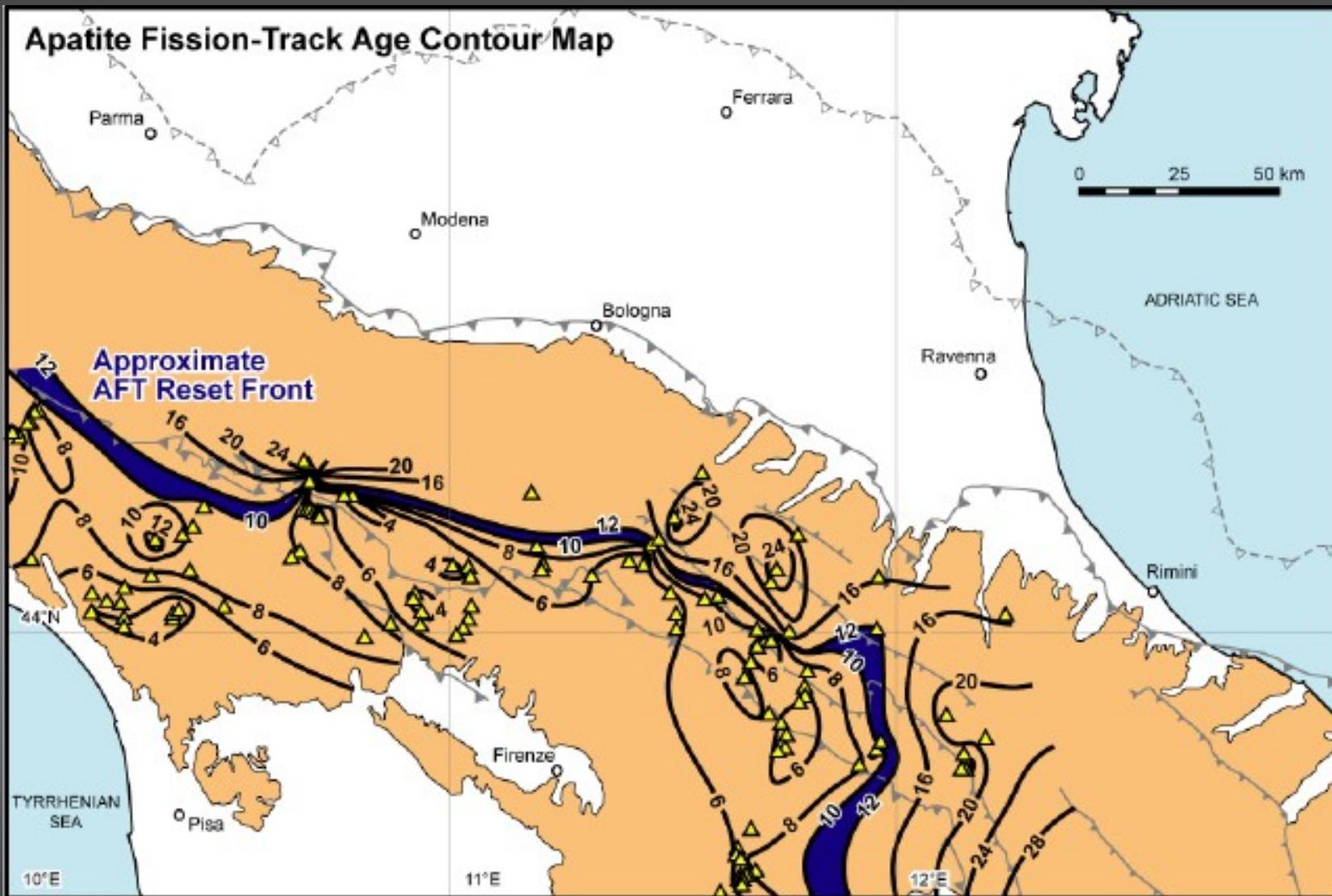
Le età delle AFT ages sono sia localmente resettate (10-13 Ma) oppure documentano una storia termica più vecchia.

Unità toscane:

Età AFT giovani (6-11 Ma). Età per la maggior parte completamente resettate e che rappresentano l'esumazione della catena.

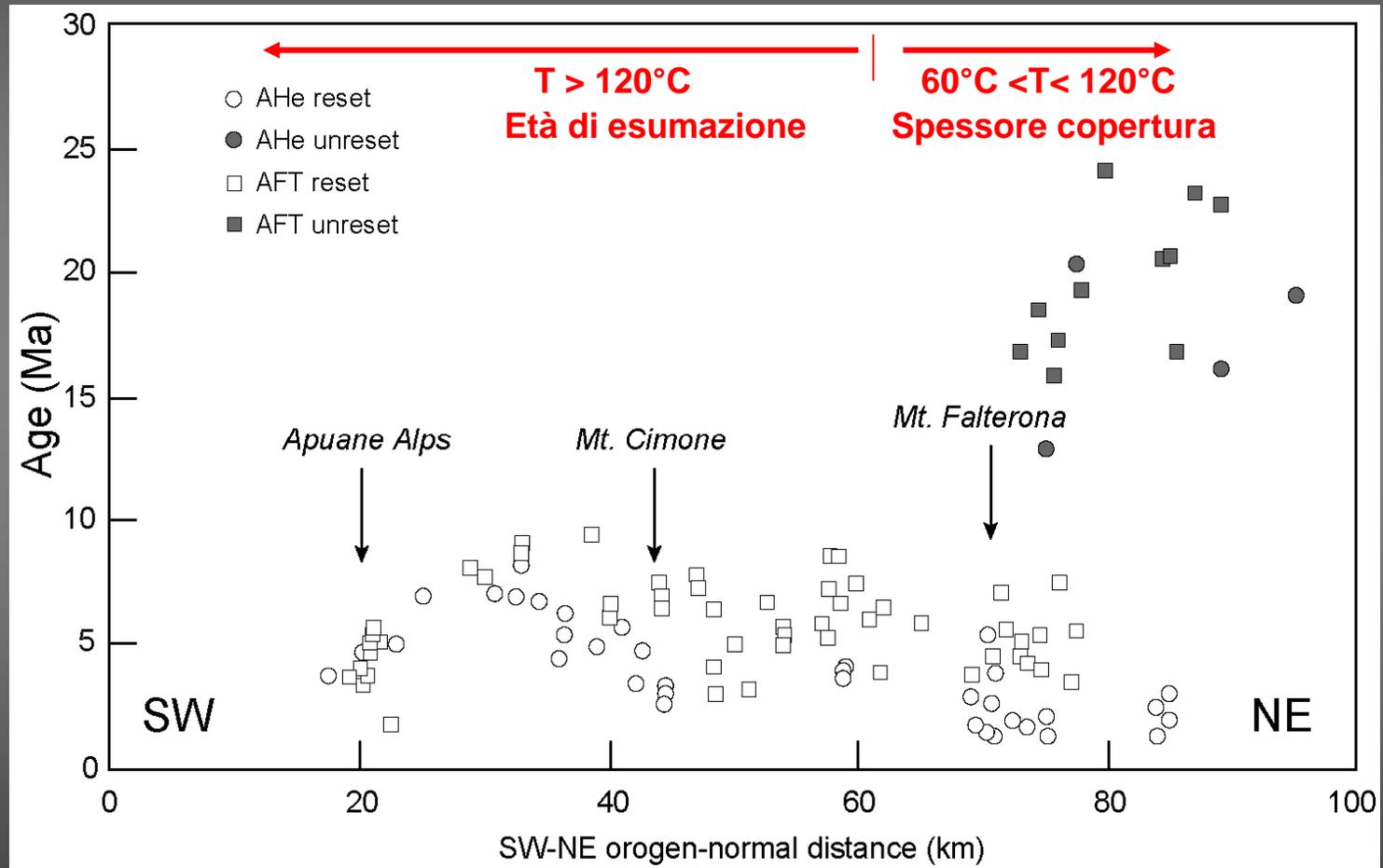
Lato Esterno, oltre lo spaticque:

Età vecchie anche di qualche centinaio di myr (Zattin et al., 2002) che indicano che le rocce dal lato Adriatico non sono mai state sepolte sotto una copertura tale da annullare completamente le FT.

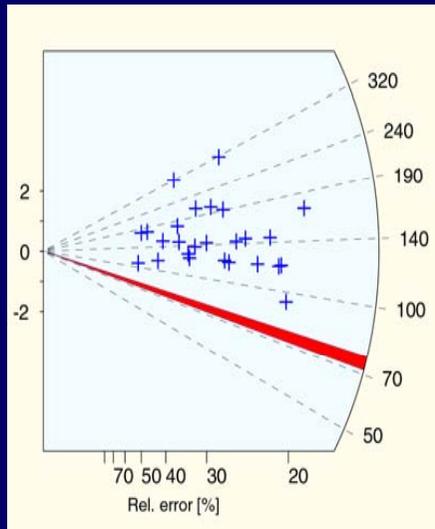


Thomson et al., 2010

Traversa SW-NE

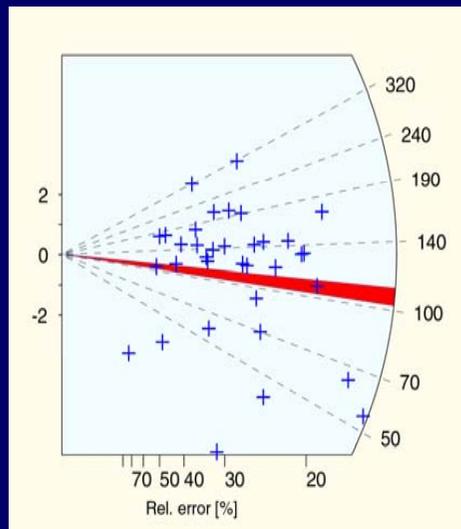


RADIAL PLOT



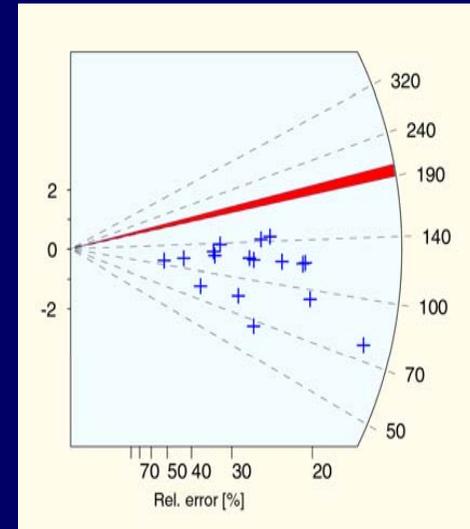
No annealing

T burial <60°C



Partial annealing

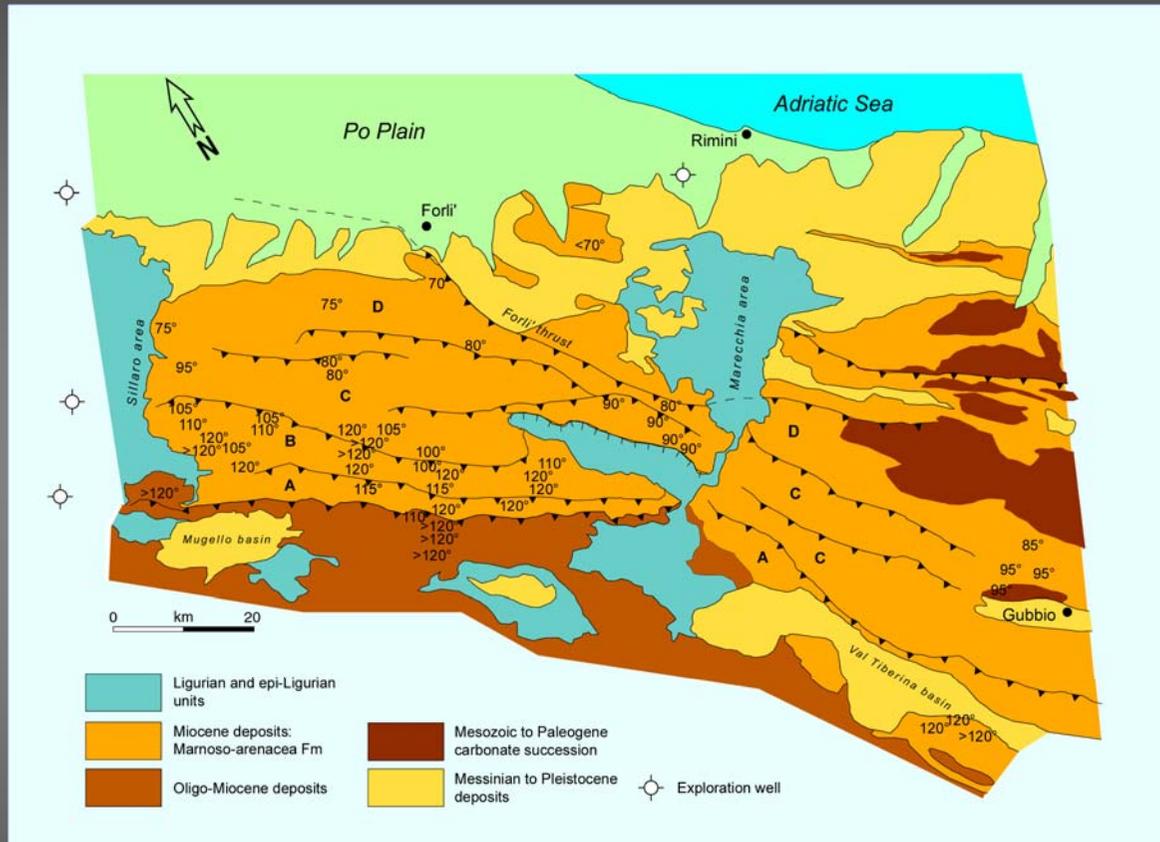
T burial 60-120°C



Total annealing

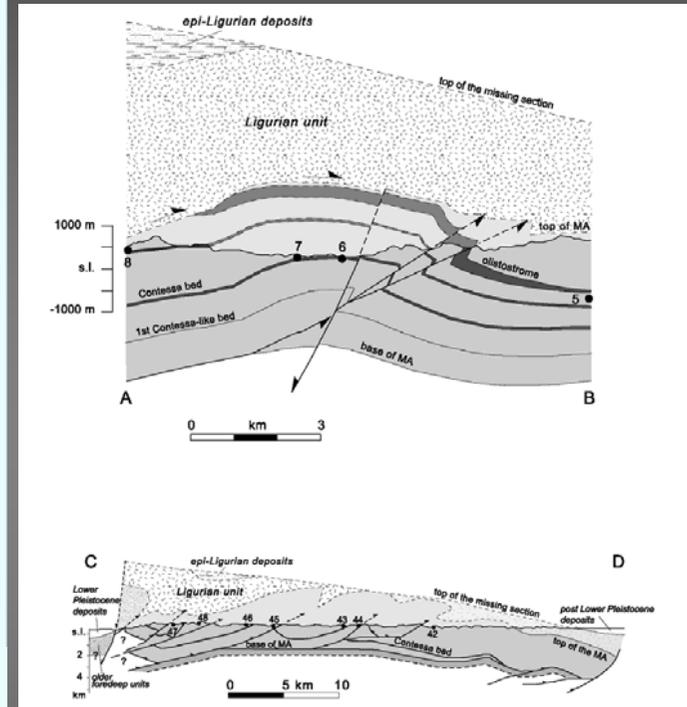
T burial >120°C

Marnoso - Arenacea



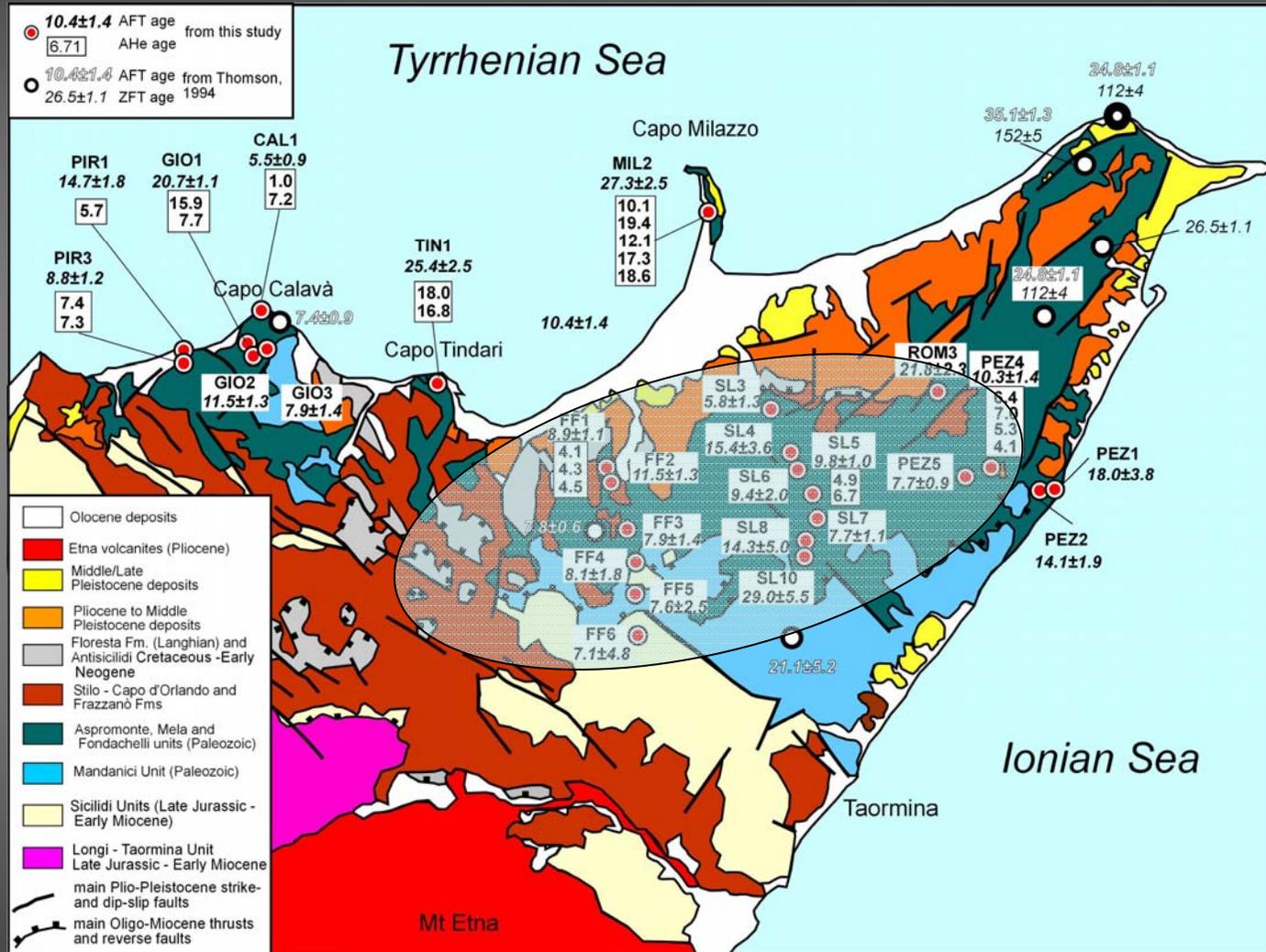
Zattin et al., 2002

Ricostruzione spessori della coltre ligure



MONTI PELORITANI

AFT ages 30 Ma and 6 Ma
AHe ages 19 Ma to 3 Ma.



Evento termico post-deposizione del CPO

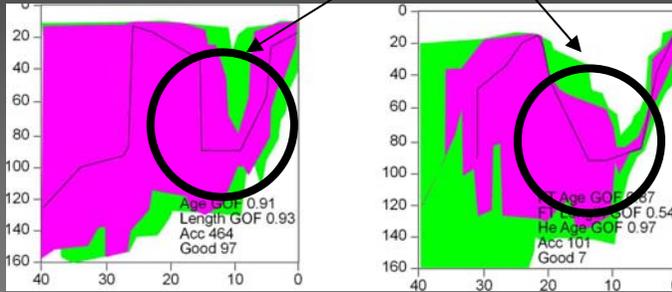
Olivetti et al., 2010

Flysch CAPO D'ORLANDO Oligocene Superiore - Burdigaliano

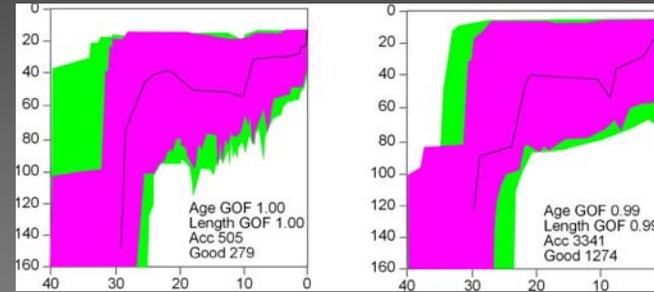
Evento termico

15-10 Ma

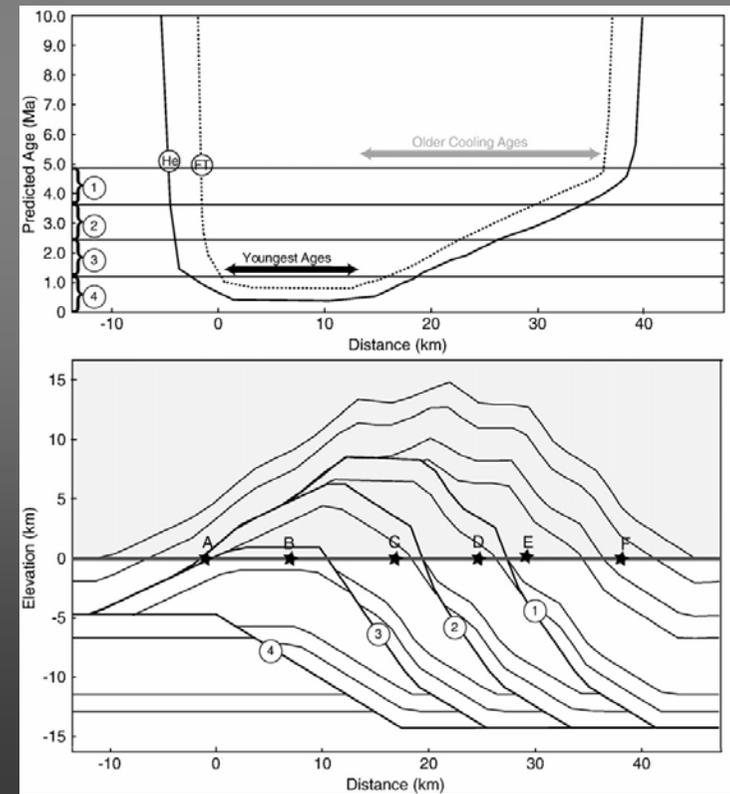
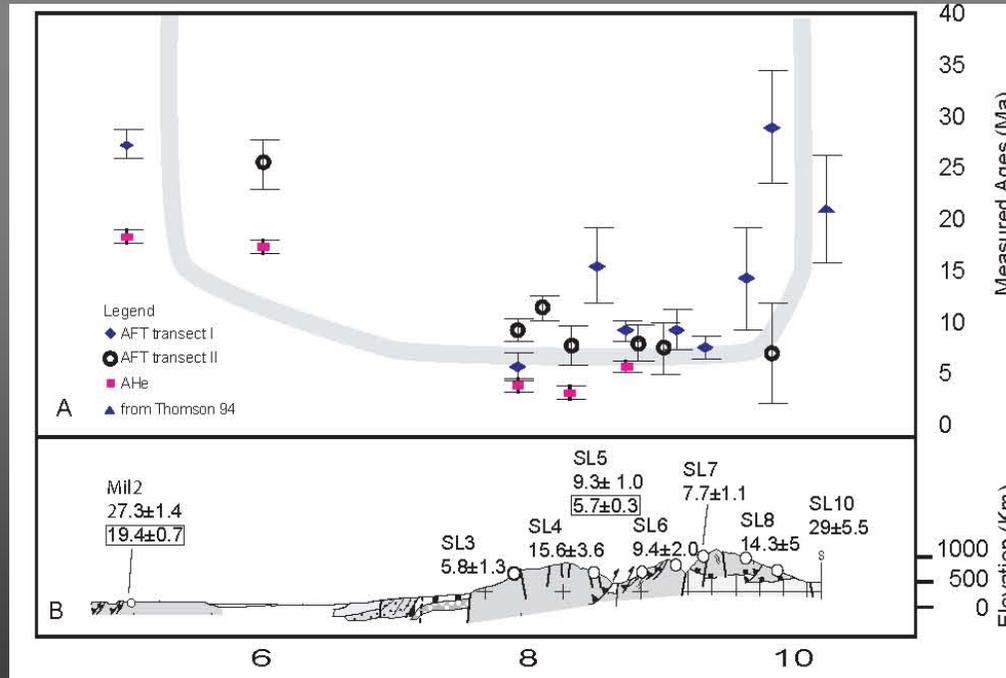
young

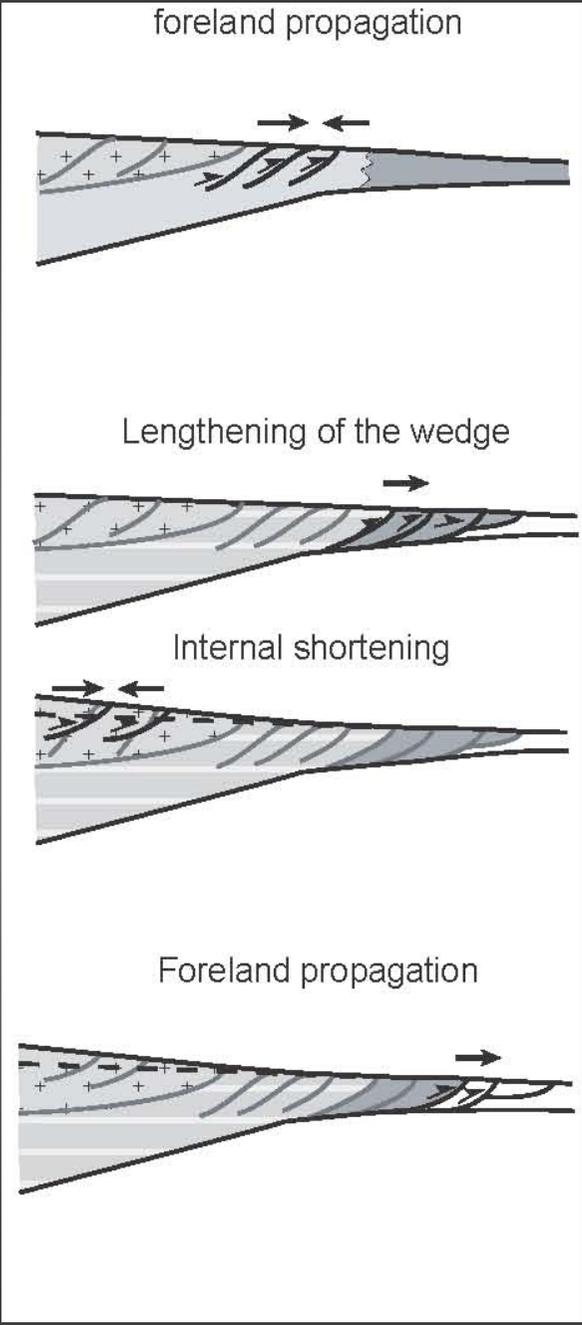
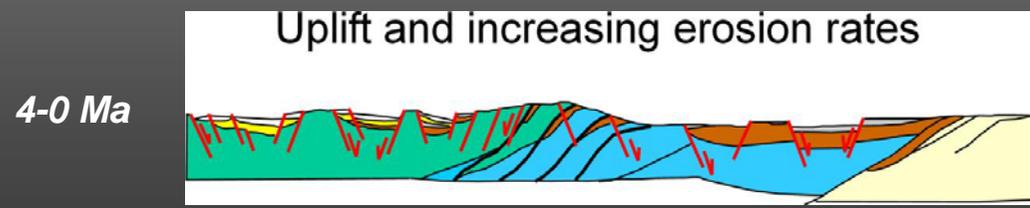
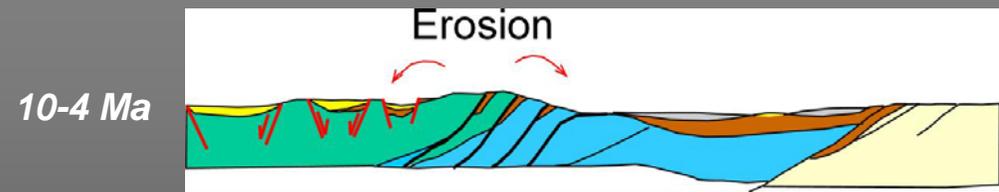
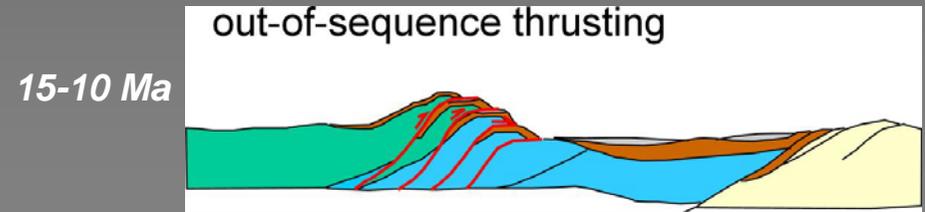
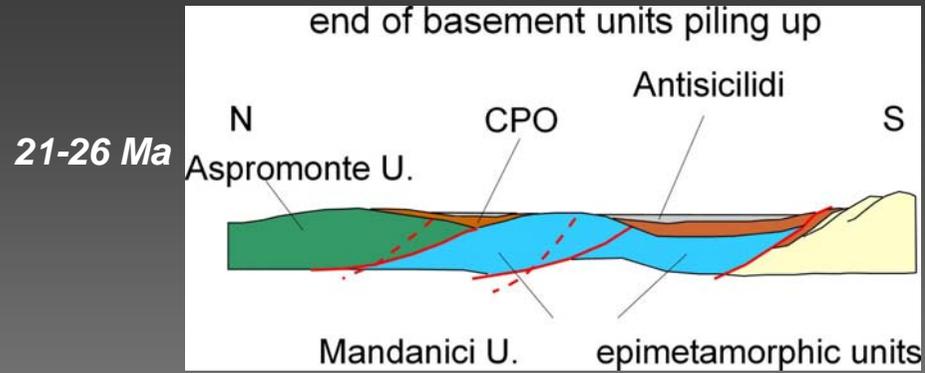


old



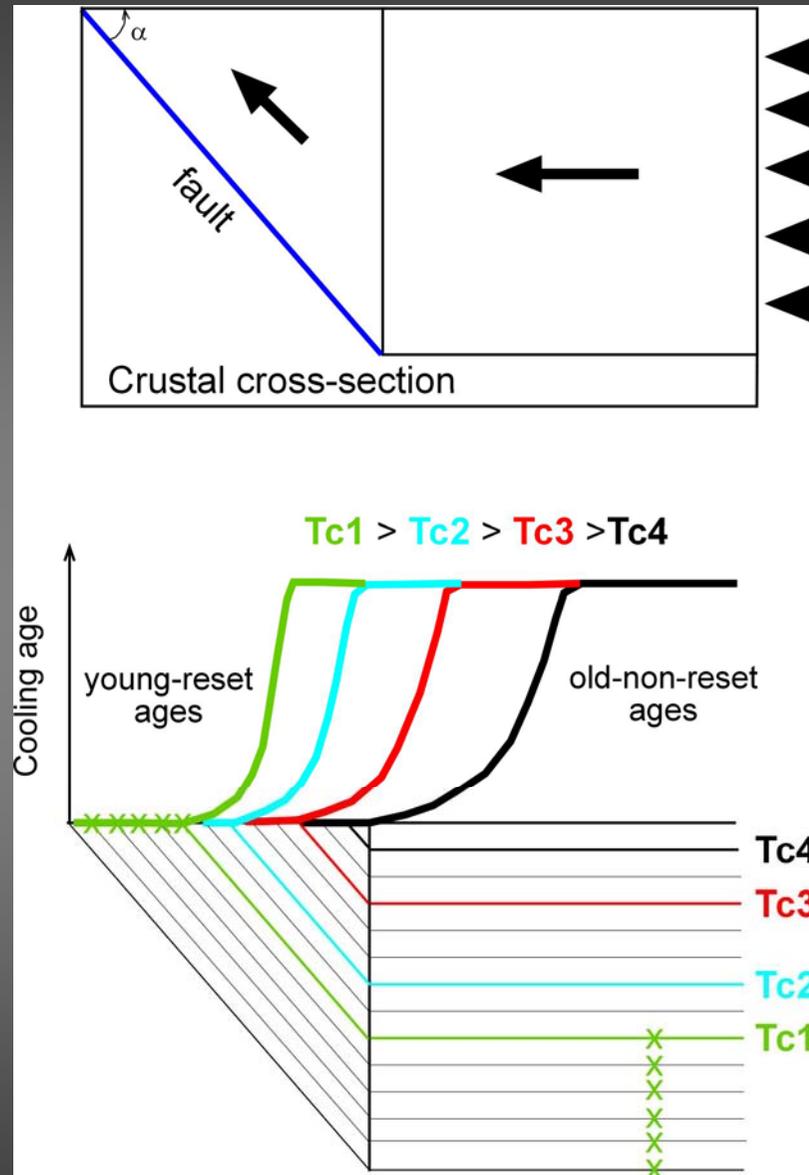
Andamento delle età





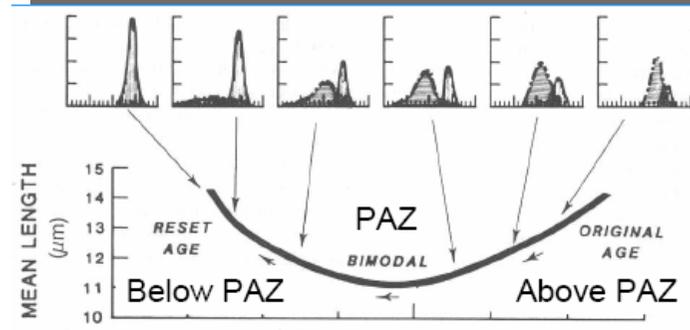
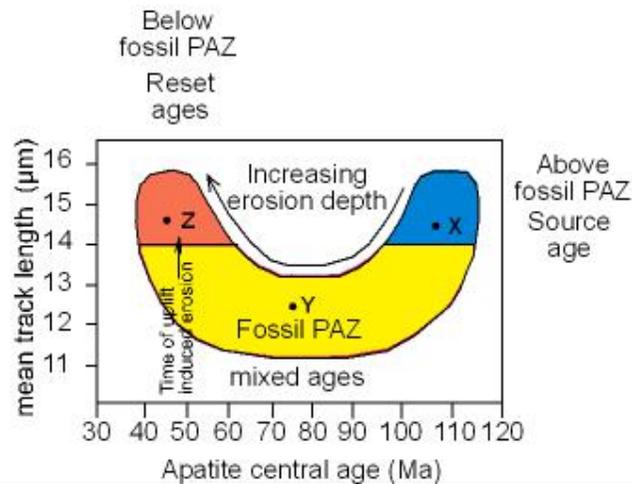
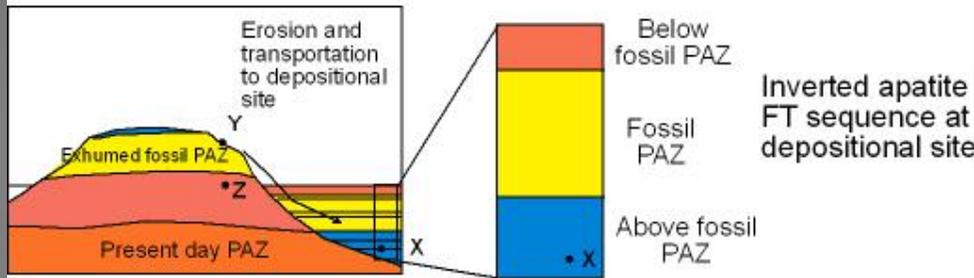
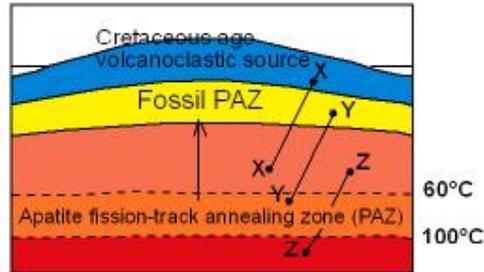
FORMA "NESTED"

L'andamento delle età termocronometriche detto "nested" è determinato dal cammino in orizzontale delle particelle nella crosta



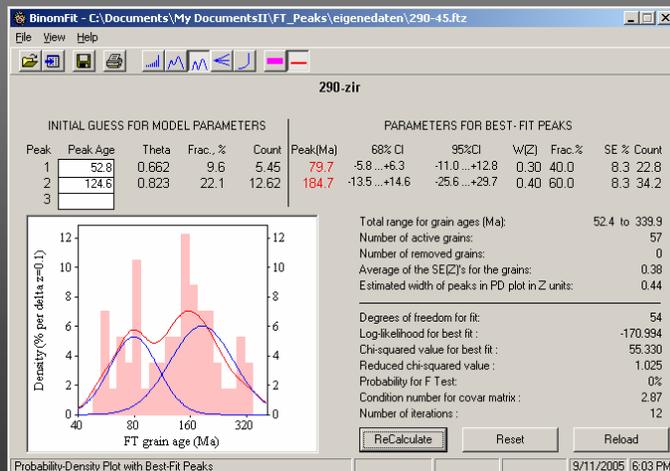
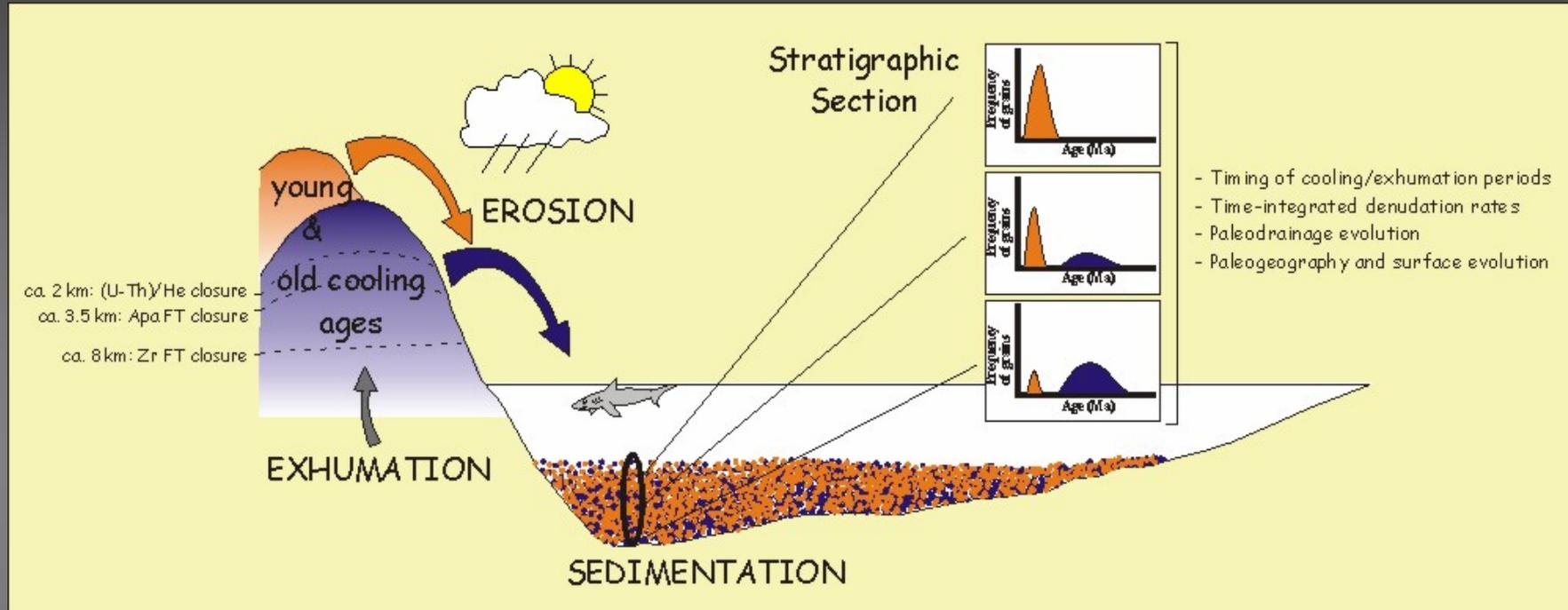
STUDI DETRITICI

Erosion initiated by uplift at c. 50 Ma



STUDI DETRITICI

A) Studi di provenienza

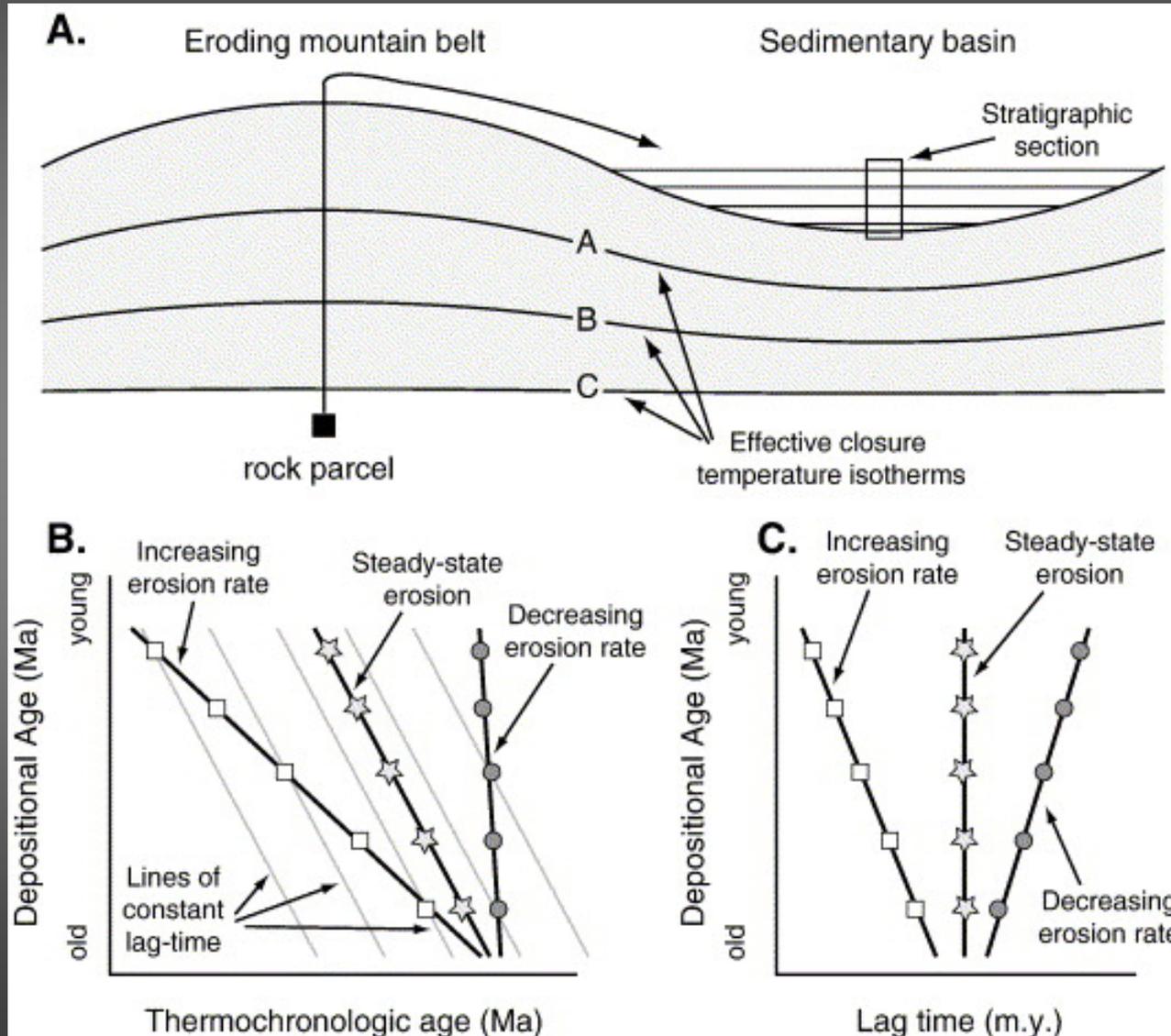


PEAK FITTING

BINOMFIT: Brandon (1992, 1996, 2002)
 Download: <http://earth.geology.yale.edu/~brandon/>

STUDI DETRITICI

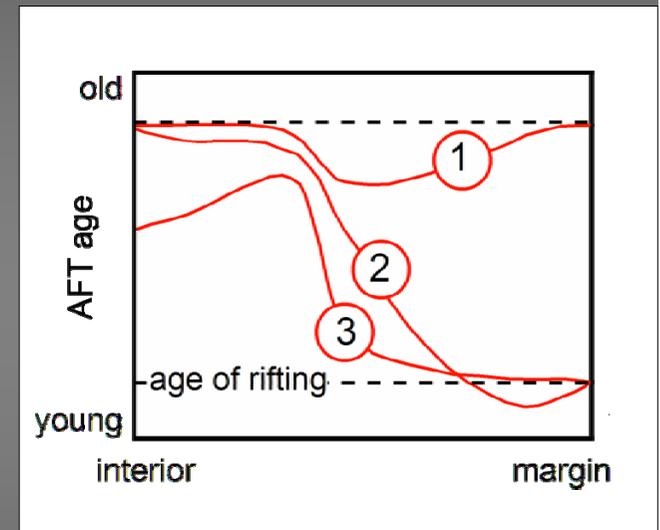
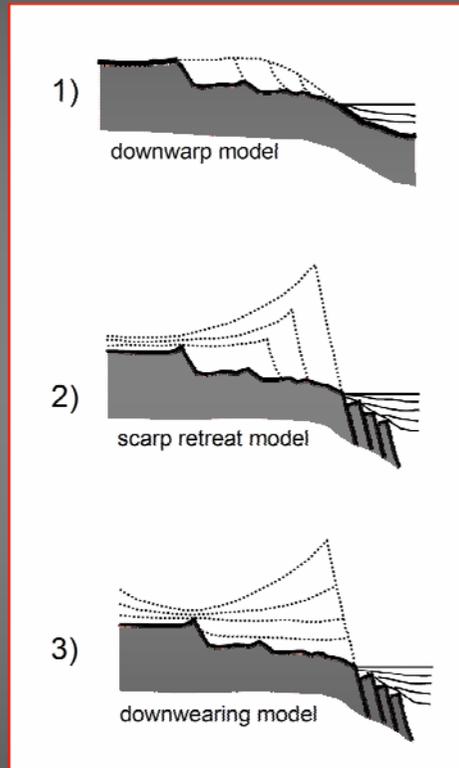
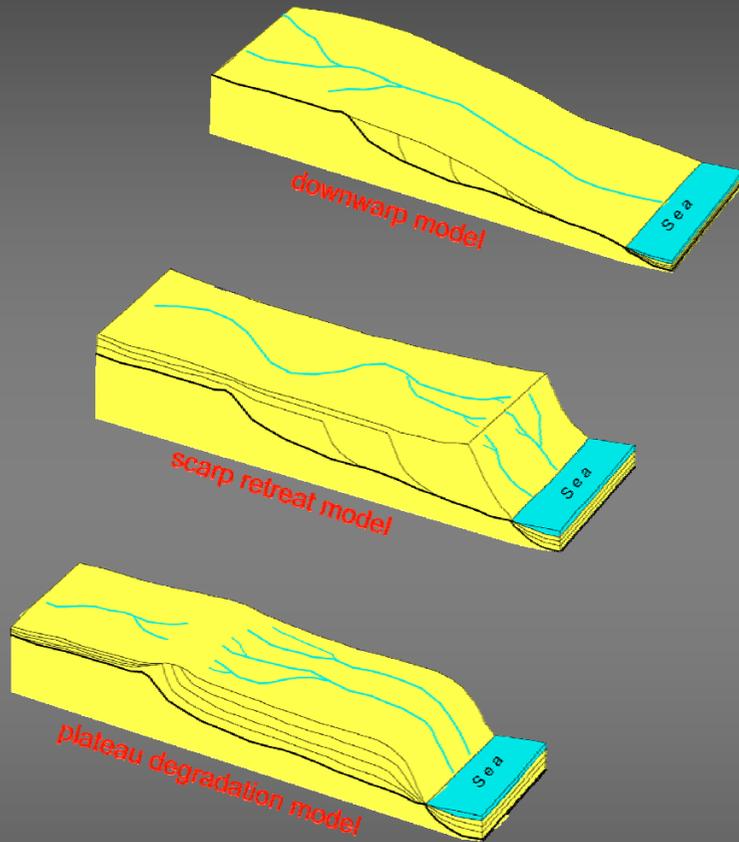
B) Esumazione della sorgente



LAG TIME

Differenza tra l'età termocronometrica e l'età Stratigrafica

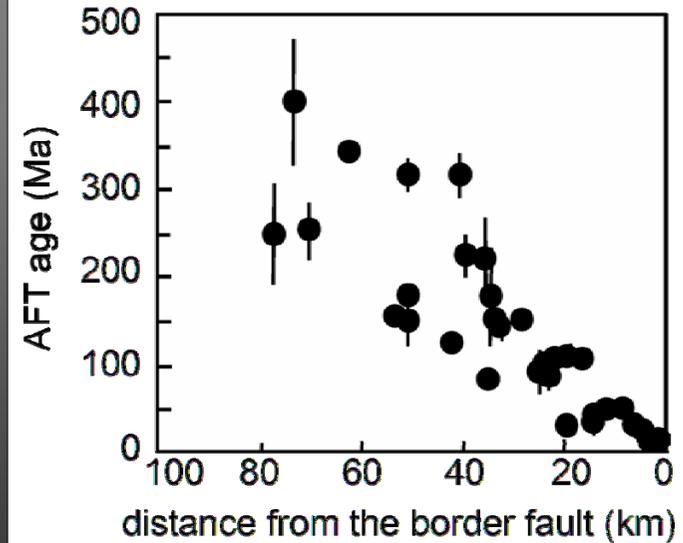
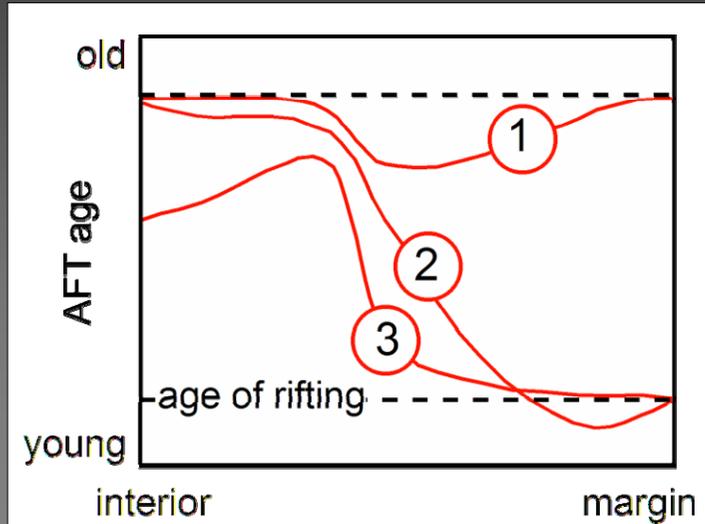
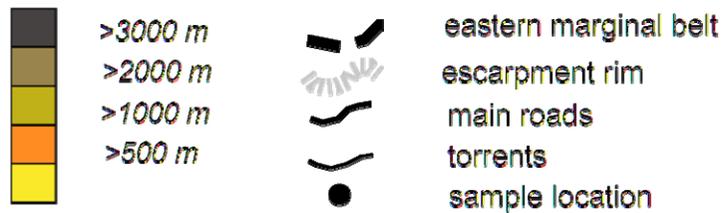
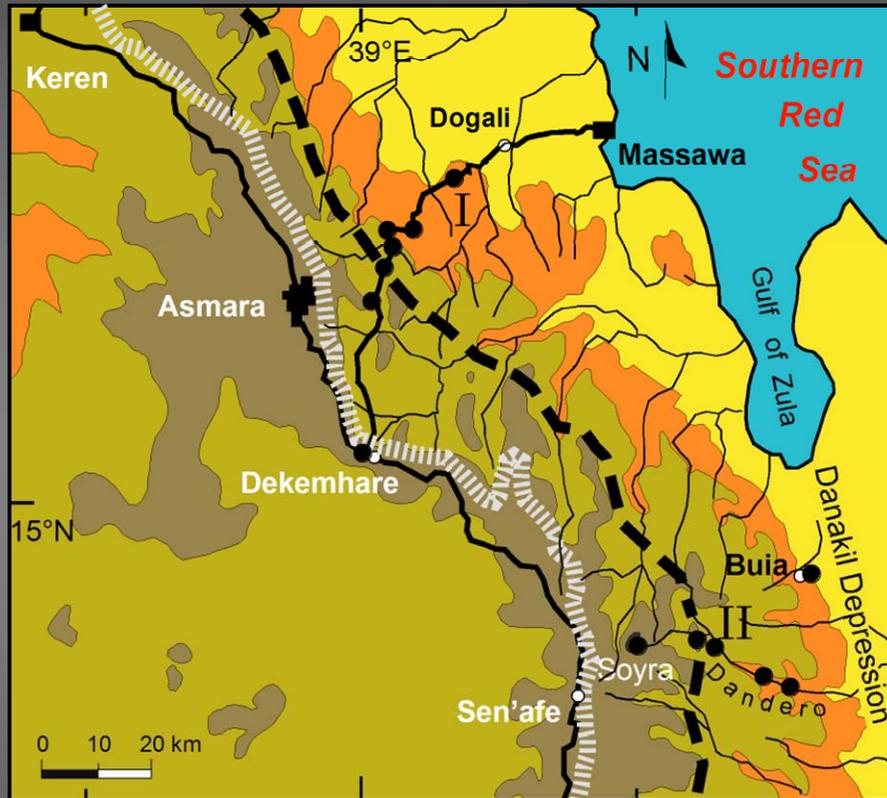
MARGINI PASSIVI



Balestrieri et al., 2005



Margine Eritreo del Mar Rosso



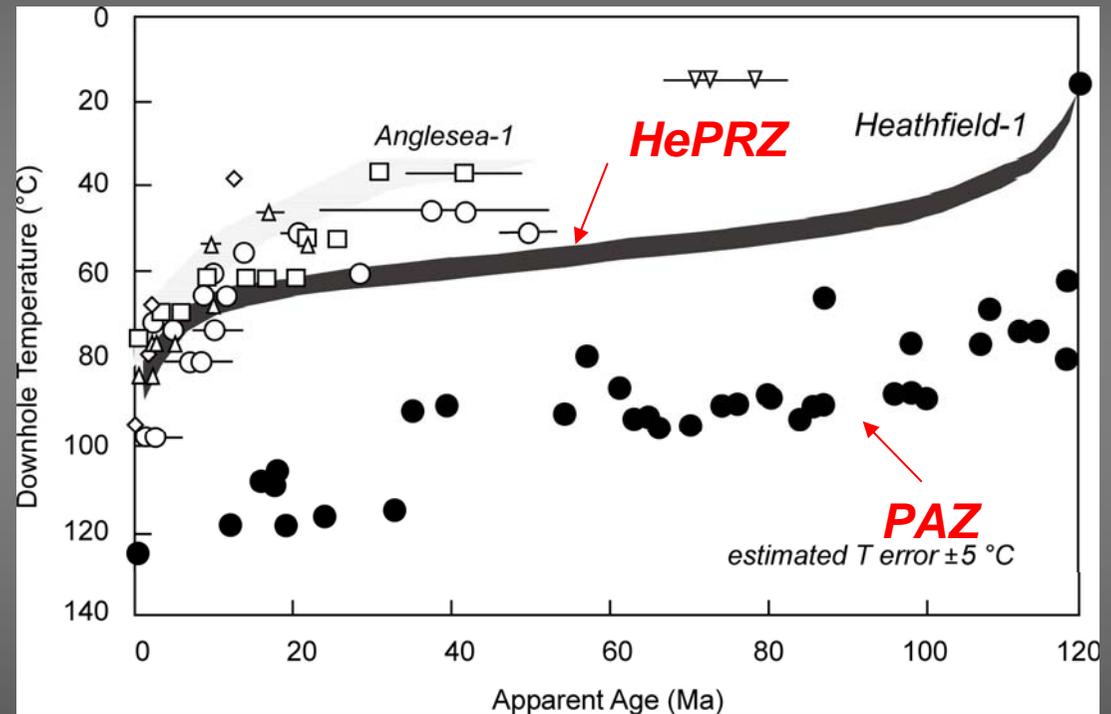
(U-Th)/He method

I nuclei di ^4He (particelle α) sono il prodotto della serie di decadimento di ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e anche di ^{147}Sm .

La temperature di chiusura del sistema dell'elio in apatite ($75\pm 5^\circ\text{C}$, assumendo un tasso di raffreddamento di $10^\circ\text{C}/\text{my}$) è sostanzialmente più bassa della T di chiusura delle AFT ($\sim 100^\circ\text{C}$) e permette di estendere la ricostruzione delle storie di raffreddamento fino a temperature superficiali.

Le età dell'elio diminuiscono scendendo in un pozzo e definiscono una Zona di ritenzione parziale dell'elio (HePRZ). La posizione della HePRZ dipende dalla storia termica della crosta ma in generale si trova tra circa 40°C e 80°C .

HePRZ in natural settings



House et al., 1999

In aree con gradiente normale la HePRZ è una banda larga ~ 2 km e centrata a 2 km di profondità. E' analoga alla PAZ delle AFT ma si trova ~ 2 km più in superficie.