



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze
Direttore Prof. Cristina Stefani

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN SCIENZE GEOLOGICHE

**GEOCHIMICA ISOTOPICA DI DICCHI E SILL
CAMP NELL'ANTI-ATLANTE, MAROCCO**

*Relatori: Prof. Andrea Marzoli
Dott.ssa Sara Callegaro*

Laureando: Niccolò Menegoni

ANNO ACCADEMICO 2012 / 2013

INDICE

Introduzione	4
1. La CAMP (Central Atlantic Magmatic Province)	6
2. La geologia del Marocco	8
2.1 L'Anti-Atlante	7
2.1.1 Il dicco Foum-Zguid	11
2.1.2 Il dicco Igherm	12
3. La CAMP in Marocco	14
3.1 Caratterizzazione geochemica delle colate del Marocco	15
3.1.1 Analisi dati degli elementi maggiori	15
3.1.2 Analisi dati degli elementi i traccia	18
3.1.3 Analisi dati degli isotopi di Nd, Sr e Pb	21
4. Geochemica dei dicchi dell'Anti-Atlante e correlazione con le colate	
CAMP dell'Alto Atlante	26
4.1 Dati elementi maggiori	26
4.2 Dati elementi in traccia	29
4.3 Dati isotopi	31
4.3.1 Preparazione dei campioni	31
4.3.2 Analisi dati	33
5. Conclusioni	36
Bibliografia	38

INTRODUZIONE

In questo elaborato si propone uno studio geochimico dei dicchi Igherm e Foum-Zguid e dei sill dell'Anti-Atlante.

L'età radiometrica e la polarità del dicco Foum-Zguid concordi all'evento CAMP ci fanno presumere che possa essere stato un dicco alimentatore delle colate CAMP dell'Alto Atlante.

Il dicco Igherm ed il dicco Foum-Zguid hanno lo stesso trend e simili dimensioni, fatto che ci fa presumere che anche il dicco Igherm sia un dicco alimentatore delle colate.

Il fine è quello di correlare i dicchi e i sill alle colate CAMP dell'Alto Atlante per capire se possono averle alimentate.

Altri lavori svolti in precedenza hanno cercato d'ottenere la correlazione in base a dati di spettrometria a fluorescenza a raggi X, ottenendo i contenuti di elementi maggiori ed in traccia, e dall'analisi in microsonda del plagioclasio.

Questo lavoro vuole fornire un chiave di lettura in più per la correlazione: gli isotopi di Nd, Sr e Pb.

Dai valori ottenuti dalla spettrometria sono stati calcolati i valori ipotetici di 200Ma fa (età che coincide con la messa in posto) e poi sono stati correlati con i valori misurati e calcolati, a 200Ma fa, delle colate dell'Alto Atlante.

1. LA CAMP (Central Atlantic Magmatic Province)

La Central Atlantic Magmatic Province (CAMP, Marzoli et al., 1999) è una delle più grandi province di plateau basaltici continentali (CFBPs). Essa è rappresentata dalle grandi effusioni di basalto tholeiitico che si trovano sotto forma di dicchi, sill e flussi di lava in Nord America, Europa, Africa e Sud America (Marzoli et al., 1999).



Fig 1 CAMP o Central Atlantic Magmatic Province, come si presentava ~200Ma fa

Questa CFBP (Continental Flood Basalt Province) si estende per circa 7500km da nord a sud su entrambi i lati dell'oceano Atlantico (Merle et al., 2001), coprendo

una superficie maggiore di $7 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Marzoli et al., 2004) ed occupando un piccolo volume (ca. $1 \times 10^6 \text{ km}^3$). Questo modesto volume può essere spiegato da una probabile erosione post-magmatica evidenziata da un trend negativo degli isotopi di Sr e Os negli strati marini del Giurassico inferiore.

È importante ricordare che molti aspetti della genesi dei CFBs sono ancora poco conosciuti e controversi. Le loro relazioni genetiche con altri fenomeni come il rifting continentale, le tracce di hot spot e le estinzioni di massa, sono legate alla geocronologia (Marzoli et al., 1999).

L'attività magmatica della CAMP si concentra in un periodo relativamente breve. I dati $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e U/Pb indicano che i basalti più vecchi sono messi in posto circa 201 Ma fa e che il picco di attività durò meno di 1×10^6 anni (Deckart et al., 1997; Marzoli et al., 1999; Hames et al., 2000).

L'età ricavata ci permette di dire che questo magmatismo è associato all'break-up della Pangea (con inizio circa 190 Ma fa) e alla successiva apertura dell'oceano Atlantico ed è sincrono alla estinzione Triassico-Giurassica.

Altri fenomeni che possono aver portato a questo magmatismo sono l'impatto della testa di un mantle plume contro la litosfera continentale (Cebria et al., 2003; Courtillot et al., 1999; Ernst and Buchan, 2002; Hill, 1991; May, 1971; Morgan, 1983; White and McKenzie, 1989; Wilson, 1997) o l'incubazione termica sotto la litosfera continentale ispessita e/o un sistema di celle convettive generato da un contrasto di spessore dei differenti domini della litosfera (Anderson, 1994; Coltice et al., 2007; De Min et al., 2003; McHone, 2000).

2. LA GEOLOGIA DEL MAROCCO

La geologia del Marocco è molto interessante da tutti i punti di vista in quanto comprende in parte il WAC (Western African Craton) ed è al punto di triplice giunzione tra continente africano, il margine collisionale Alpino e oceano Atlantico.

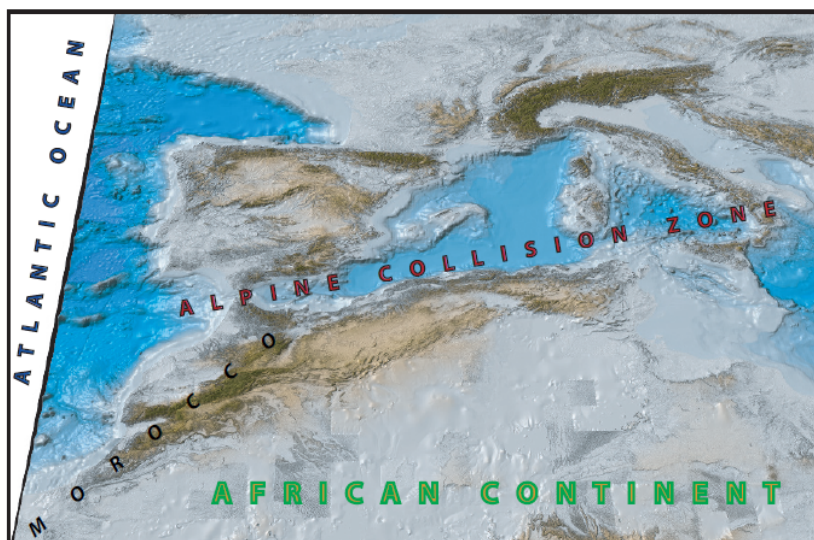


Fig. 2.1 Modello numerico dell'elevazione e batimetria con vista obliqua dell'aerea ovest del Mediterraneo. Questa immagine ci mostra la posizione del Marocco alla triplice giunzione tra continente Africano, oceano Atlantico e margine collisionale Alpino (A. Michard, D. Frizon de Lamotte, O. Saddiqi and A. Chalouan 2008, *Continental evolution: Geology of Morocco*, fig 1.1)

Qui si possono trovare testimonianze di rocce e sistemi tettonici che vanno dall'Archeano-tardo Precambriano (rocce del "Reguibat Arch" e testimonianze dell'Orogenesi Pan-Africana) fino al Cenozoico (depositi quaternari e Orogenesi Alpina).

La geologia offerta dal Marocco, oltre ad avere un interesse scientifico, ha un grande interesse economico. Qui si possono trovare risorse di metalli come Cu, Pb, Au, Ag, Zn, Ba ed anche i più grandi depositi di fosforiti mondiali (A. Michard et al., 2008).

Inquadramento:

nella parte più a nord del Marocco, si trova il dominio del Rif che si estende lungo la costa mediterranea affacciandosi sul mare di Alboràn.

Questo dominio comprende una parte della catena alpina: la catena del Rif.

La catena del Rif ha una classica struttura “thrusts and folds” e rappresenta la parte più occidentale della catena marocchina.

Il dominio del Rif si congiunge a nord con la cordigliera betica ed ad ovest con il dominio del Tell (continuazione della catena marocchina).

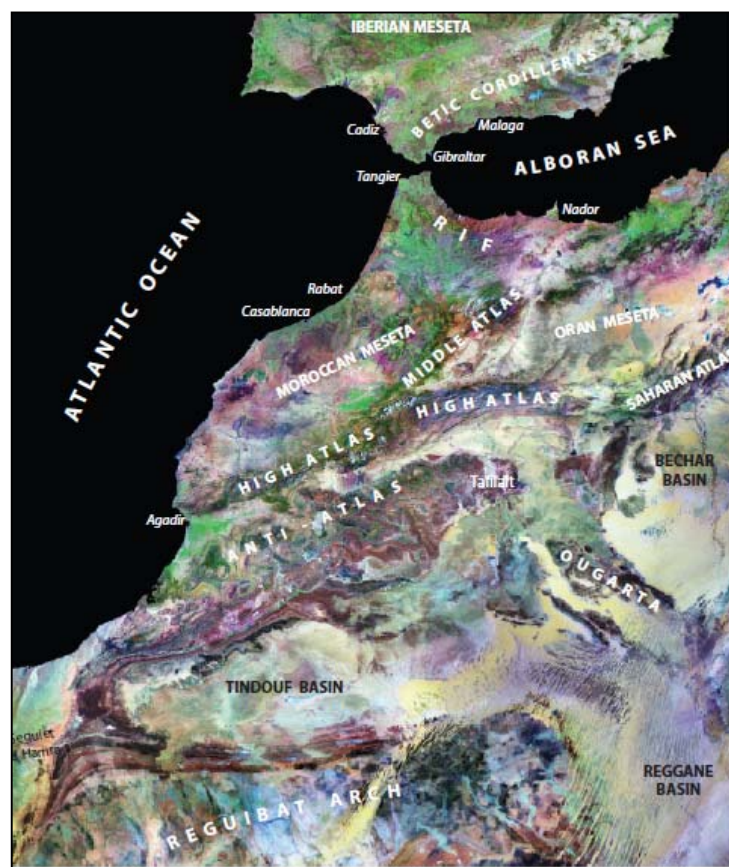


Fig.2.2 Immagine Landsat del Marocco (A. Michard, D. Frizon de Lamotte, O. Saddiqi and A. Chalouan, 2008, Continental evolution: Geology of Morocco, fig.1.12)

Spostandosi più a sud si trova un dominio di altipiani quali la Meseta marocchina (Eastern Meseta) e quella dell’Oran (Western Meseta).

A sud del dominio degli altipiani si innalza l’Atlante.

L'Atlante è una tipica fold (and thrust) belt e si sviluppa principalmente in direzione SWW-NEE. L'Atlante è diviso in tre domini principali:

-Alto Atlante

-Medio Atlante

-Atlante sahariano.

L'Alto Atlante ha trend est-nordest, va dall'oceano Atlantico all'Algeria dove poi continua sotto il nome di Atlante Sahariano e comprende molte delle vette più alte del Nord Africa (es. Jebel Toubkal, 4165m).

Dal mezzo dell'Alto Atlante parte verso nord un braccio dell'Atlante, il Medio Atlante, il quale divide il dominio degli altipiani in Meseta Ovest (Meseta marocchina) e Meseta Est (Meseta dell'Oran)

Al di sotto dell'Atlante inizia il dominio sahariano. Il limite nord ovest di questo dominio è costituito dall'Anti Atlante, una "fold belt" che si sviluppa parallelamente all'Alto Atlante.

Si pensa che che questo dominio montuoso si sia sollevato contemporaneamente all'Alto Atlante come risultato di convergenza (crust thickening) e uplift dell'astenosfera (Morrocco Hot Line).

2.1. L'Anti-Atlante

Il limite del confine tra dominio subsahariano e Alto Atlante nella regione sud-ovest del marocco è segnato da una fold-belt ercinica, l'Anti-Atlante.

L'Anti-Atlante è a diretto contatto con l'Alto Atlante nell'area di Siroua-Ouzellarh, da dove a ovest iniziano a essere separati da bacini di età neogenica (Bacino di Souss), mentre ad est dal Siroua plateau (bacini di Ouarzazate e di Errachidia-Boudenib).

L'elevazione media va circa da 2000 a 2500 metri s.l.m., eccetto nell'area di Siroua, dove è coperto da un vulcano neogenico che culmina a 3300 metri s.l.m..

Questa catena è caratterizzata da una serie di inliers (detti anche "boutonnieres") di età precambriana che affiorano lungo l'asse della catena (vedi fig.4.4).

In questa catena troviamo prevalentemente rocce di età compresa tra il Precambriano (gneiss e micascisti Neoproterozoici) e il Carbonifero (conglomerati, scisti e calcari).

Sono presenti anche una serie di intrusioni di dicchi e sill gabbroidi-doleritici di età triassica, tra cui i più importanti: il dicco Foum-Zguid e il dicco Igherm.



Fig. 2.3 Domini maggiori dell'area marocchina. Localizzazione dei due dicchi Igherm e Foum-Zguid.

Immagine presa da Bing Map Aerial

2.1.1 Il dicco Foum-Zguid

Il dicco Foum-Zguid è una struttura intrusiva verticale con trend NE-SW, che taglia una serie di rocce che vanno da età precambriana a paleozoica (Hollard, 1973; Leblanc, 1974).



Fig.2.4 Dicco Foum-Zguid: vista tiltata verso nord della parte più affiorante del dicco. Si nota come si sovrappone a strati e strutture preesistenti. Immagine presa da Google Earth

È lungo approssivamente 200Km con uno spessore medio di 100m ed è rimasto tettonicamente stabile dalla messa in posto (Marcais and Choubert, 1956).

Secondo Aarab et al. (1994), il magma tholeitico del dicco di Foum-Zguid ha subito un trend significante di differenziazione che ha portato alla presente visibile transizione graduale da dolerite ai margini, a granofiro in centro (Silva et al., 2010).

Questo dicco è stato datato la prima volta a 189Ma con metodo K/Ar (Hailwood and Mitchell, 1971) e dopo più precisamente a 196.9 ± 1.8 Ma con metodo $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Sebai et al., 1991).

Nel dicco è presente una preponderante polarità normale della magnetizzazione rimanente, indicando così che questo viene per la maggior parte messo in posto e raffreddato durante un singolo intervallo di polarità.

L'alta frequenza della inversioni nella scala del tempo della polarità magnetica del tardo Giurassico ci indica che l'intrusione del dicco avviene in un periodo relativamente breve (Silva et al., 2010).

L'età radiometrica e la polarità ci dicono che questo dicco viene messo in posto nel periodo della CAMP e quindi presumiamo che sia stato un dicco alimentatore delle colate CAMP dell'Alto Atlante.

2.1.2 Il dicco Igherm (o Ighrem o Ihrem)

Il dicco Igherm è una struttura intrusiva verticale con trend uguale e simile spessore del dicco Foum-Zguid(NE-SW).

Come il dicco Foum-Zguid, il dicco Igherm taglia le rocce che vanno da età precambriana a paleozoica (Carbonifero).

Queste caratteristiche ci fanno pensare che il dicco abbia la stessa età del dicco Foum-Zguid e che quindi potrebbe essere anch'esso un dicco alimentatore delle colate dell'Alto Atlante.

3. LA CAMP IN MAROCCO

Una vasta regione del Marocco è stata interessata dal magmatismo basaltico della CAMP che appare ai nostri occhi sottoforma di colate di lava, dicchi e sill con composizione tholeiitica.

Tre regioni del Marocco centrale e settentrionale sono state studiate precedentemente: l'Alto Atlante centrale, il bacino di Argana e il bacino di Oujada (Marzoli et al., 2004).

La sequenza di lava basaltica meglio preservata si trova nell'Alto Atlante centrale (fig. 3.1: sezione di Tiourjdal) dove raggiunge uno spessore massimo di circa 300m ed è composta da circa 30 colate di lava (Marzoli et al., 2004).

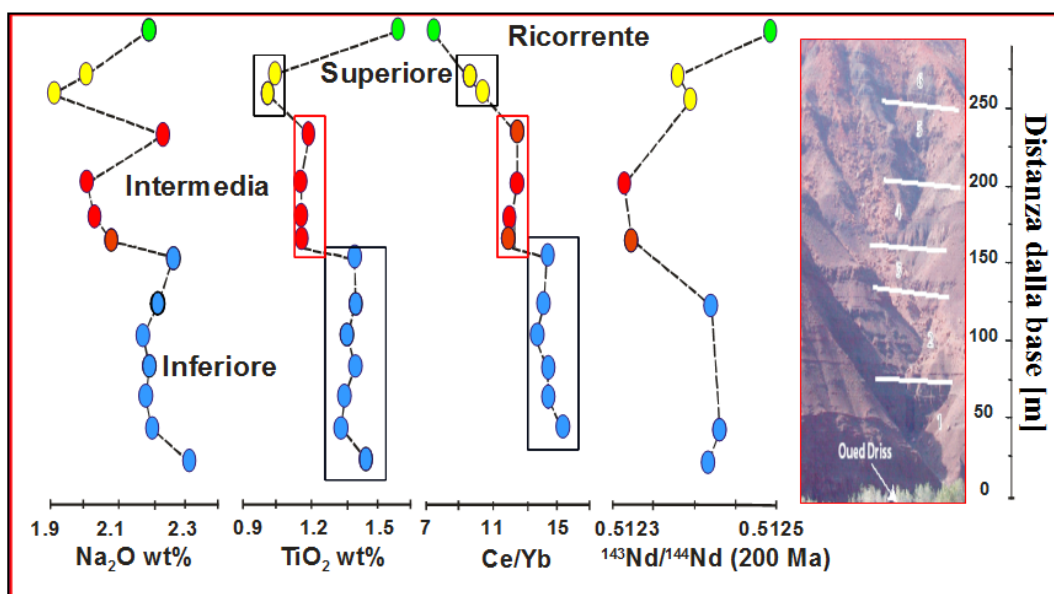


Fig.3.1 Sezione di Tiourjdal: a destra la sezione con scala metrica e a sinistra i grafici degli elementi più rappresentativi. Si possono notare le diverse composizioni geochemiche delle quattro unità

Dal basso verso l'alto si distinguono geochemicamente quattro diverse unità di basalti tholeitici:

- inferiore (lower)
- intermedia (intermediate);
- superiore (upper);
- ricorrente (recurrent).

Le prime due unità sono composte da una decina di colate di lava e rappresentano all'incirca l'80% del volume preservato dell'intera pila, mentre le ultime due sono composte da poche colate di lava e sono separate da uno strato sedimentario di spessore di circa 80m (Marzoli et al., 2004).

Generalmente l'unità inferiore e quella intermedia sono presenti in tutti i bacini studiati, quella superiore può essere localmente assente, mentre quella ricorrente è presente soltanto nei bacini dell'Alto Atlante centrale.

3.1. Caratterizzazione geochimica delle colate del marocco:

3.1.1 Analisi dati degli elementi maggiori

Le colate CAMP del Marocco hanno un trend che rispecchia il grado d'evoluzione del magma, da una composizione intermedia (andesite/andesite basaltica) ad una basica (basalto), partendo da magmi generati da bassi gradi di fusione (F) e alta contaminazione crostale ed arrivando a magmi prodotti da maggiore F e minor contaminazione crostale.

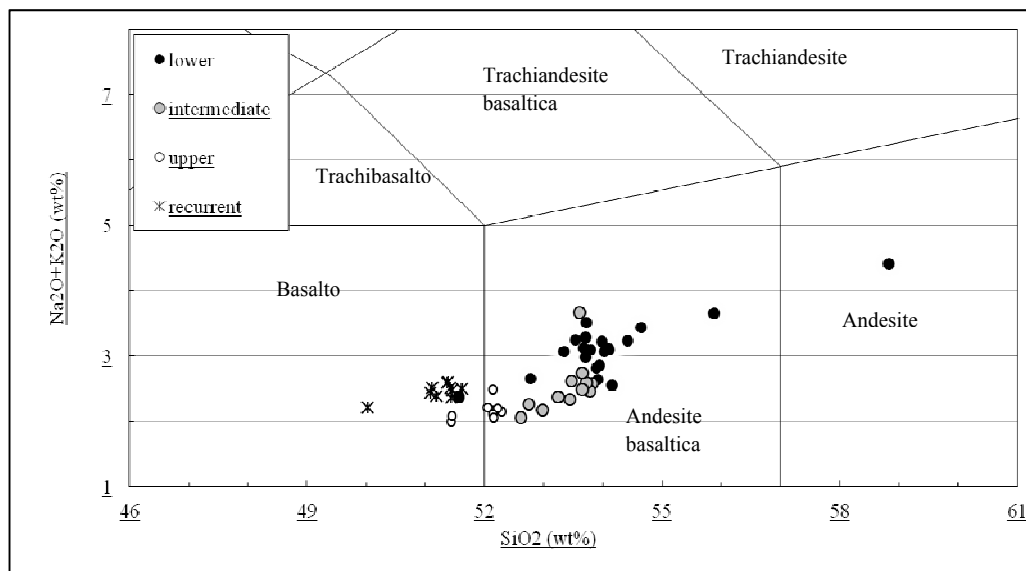


Grafico 3.1 Diagramma TAS modificato: ingrandimento dell' area d'interesse.

Dallo studio degli elementi maggiori si nota che l'unità ricorrente è discordante rispetto alle tre che la precedono.

Nel grafico TiO_2 - MgO l'unità ricorrente non segue il trend delle altre tre ma si sposta verso valori più elevati in TiO_2 e minori in MgO .

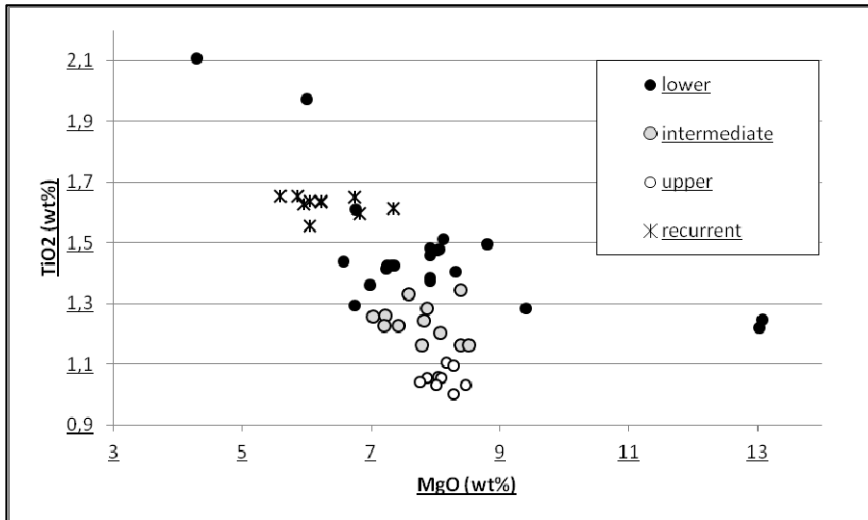


Grafico 3.2) MgO - TiO_2

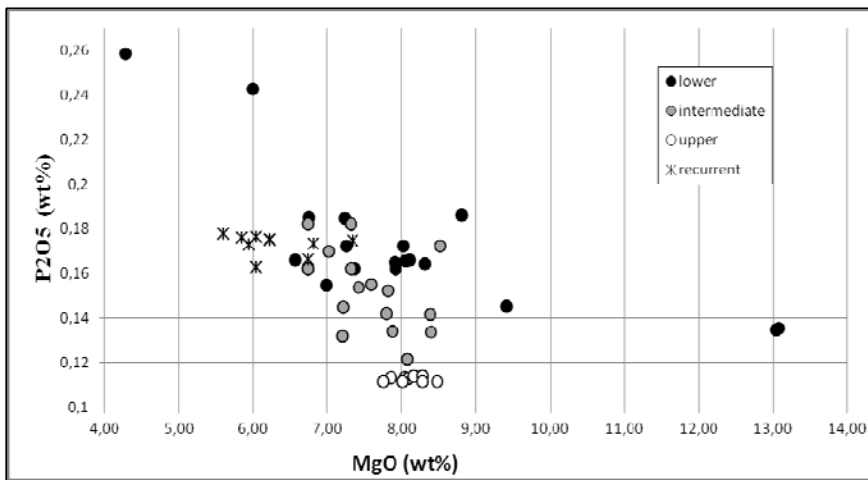


Grafico 3.3) MgO - P_2O_5

Nei grafici P_2O_5 - MgO e Al_2O_3 - MgO l'unità ricorrente assume lo stesso comportamento.

Si nota che i suoi valori coincidono all'incirca con quelli delle colate meno evolute dell'unità inferiore.

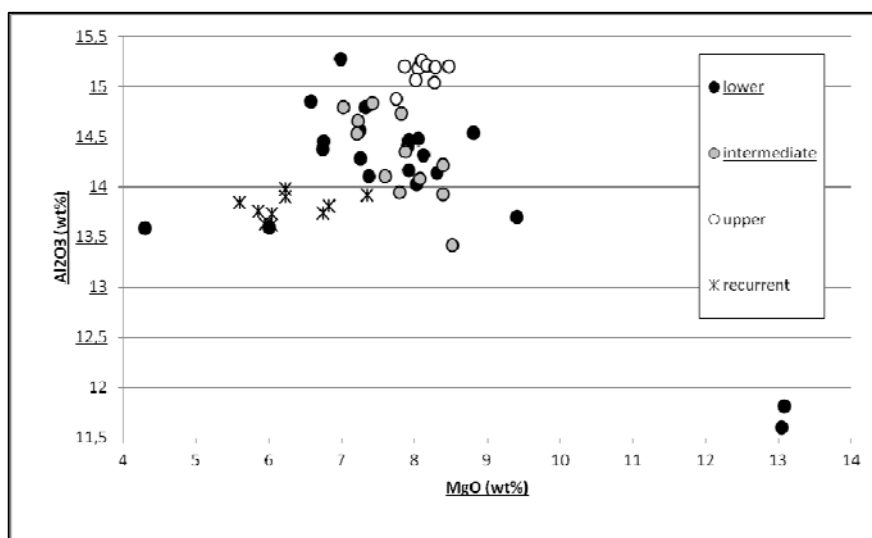


Grafico 3.4.) Al₂O₃ - MgO

Infine, costruendo i grafici con i due elementi in traccia Ni e Cr (Ni - MgO e Cr - MgO) si nota nuovamente la discordanza, dell'unità ricorrente, dal trend evolutivo delle prime tre unità, con valori generalmente più bassi della media dell'unità inferiore.

Questo può indicare che l'unità ricorrente si genera con un grado di fusione minore e/o da un mantello più differenziato.

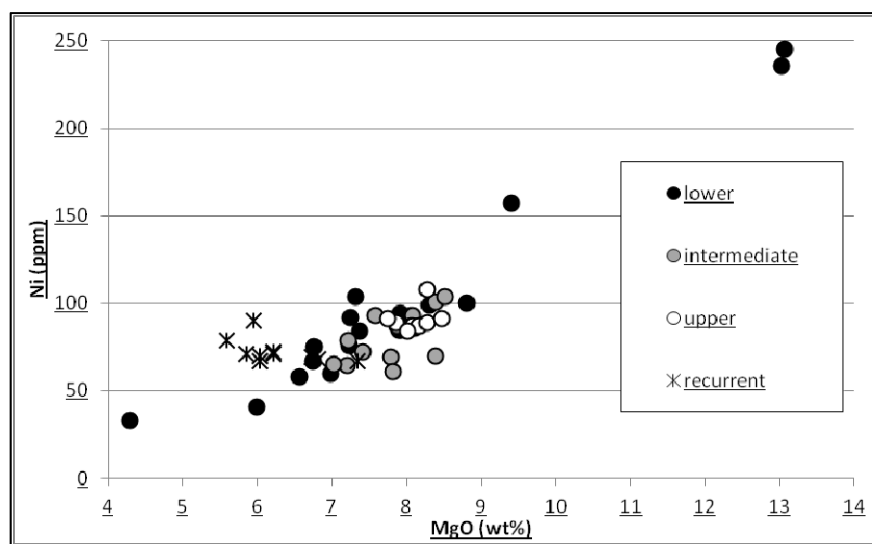


Grafico3.5) Ni - MgO

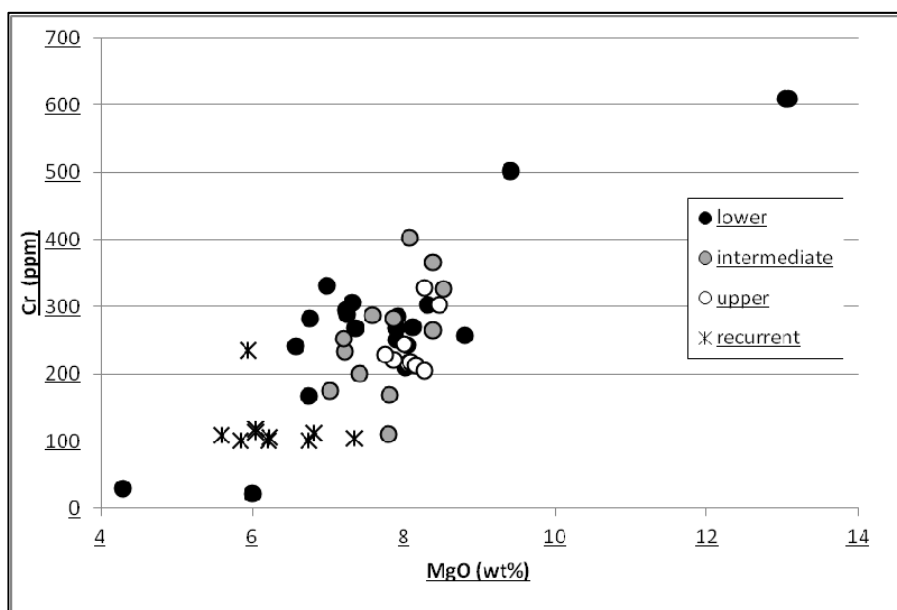


Grafico 3.6) Cr - MgO

3.1.1. Analisi dati elementi in traccia

Analizzando gli elementi in traccia si può notare che i rapporti La/Sr, La/Rb e La/(La/Yb) mostrano una generale diminuzione degli elementi incompatibili (con basso $D^{s/l}$). Notiamo come sempre che l'unità ricorrente si scosta dal trend generale delle tre unità precedenti.

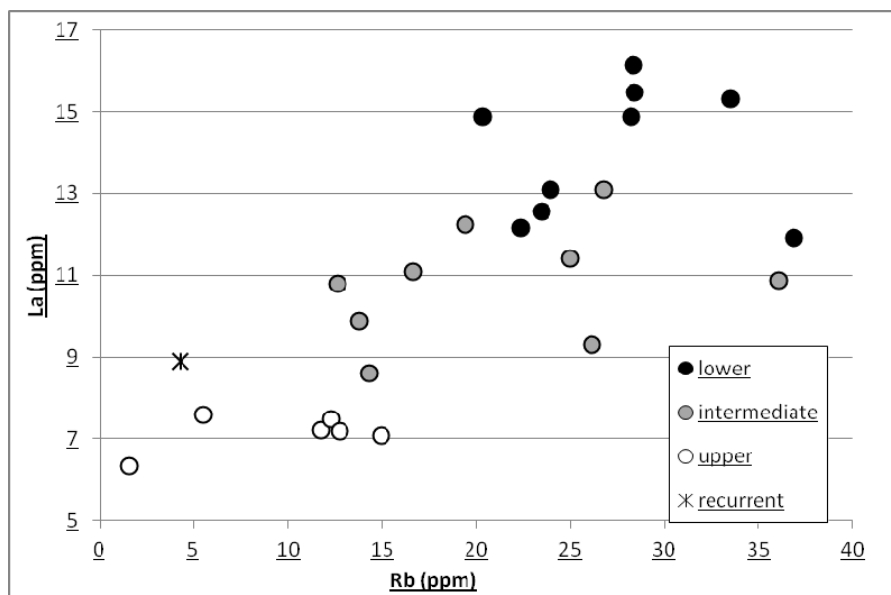


Grafico 3.7) La - Rb

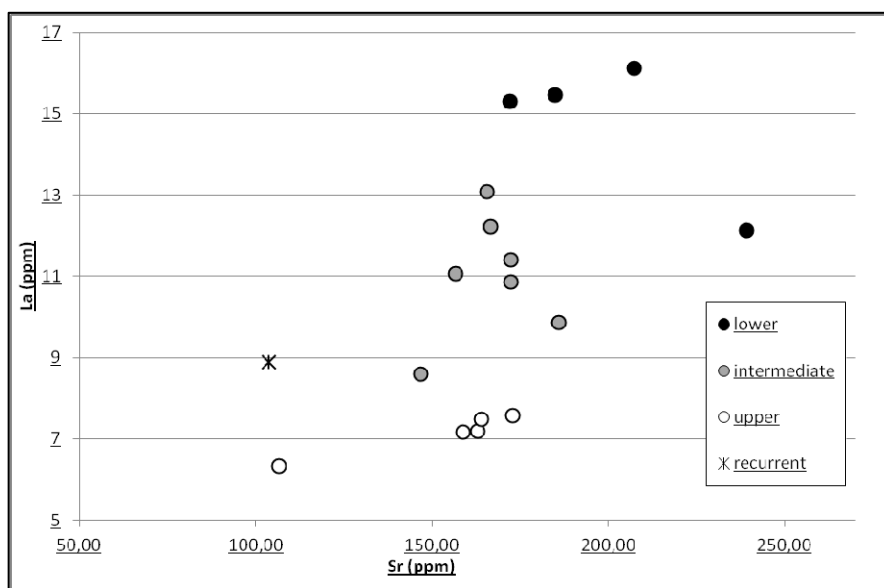


Grafico 3.8) La - Sr

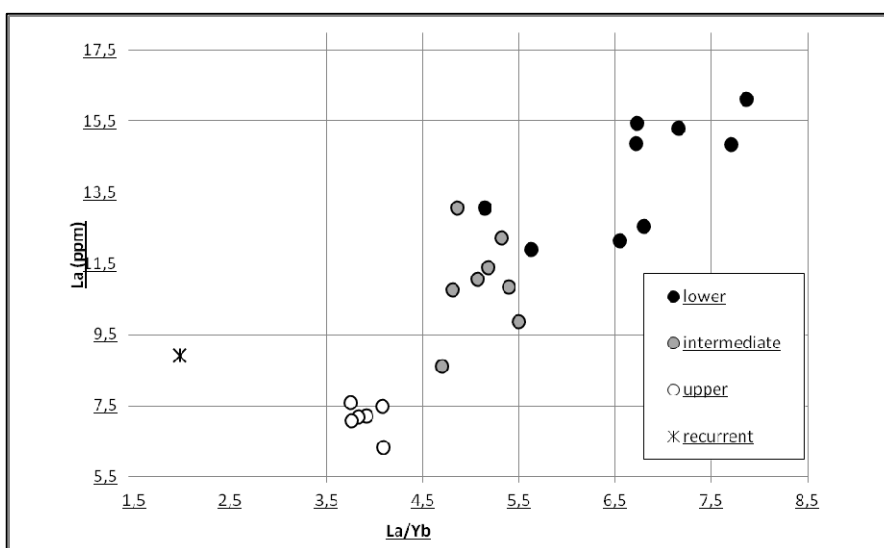


Grafico 3.9) La - La/Yb

Il grafico 3.10 ci mostra le concentrazioni normalizzate ai valori delle Condriti dei Lantanidi nelle varie unità.

Le prime tre unità mostrano un impoverimento in Lantanidi pesanti, mentre l'unità ricorrente mostra un arricchimento.

La spiegazione del perché l'unità ricorrente mostra valori differenti rispetto le altre unità, implica che vi sia stato un cambio composizionale del mantello da cui sono stati estratti magmi.

Utilizzando le varie formule che indicano il frazionamento dei vari elementi, notiamo che la funzione dalla fusione non modale o “non-modal batch melting”, fitta bene i nostri dati.

Questa ci indica che le prime tre unità seguono un frazionamento dovuto alla fusione da un mantello a granato, mentre la ricorrente segue un frazionamento dovuto alla fusione di un mantello a spinello.

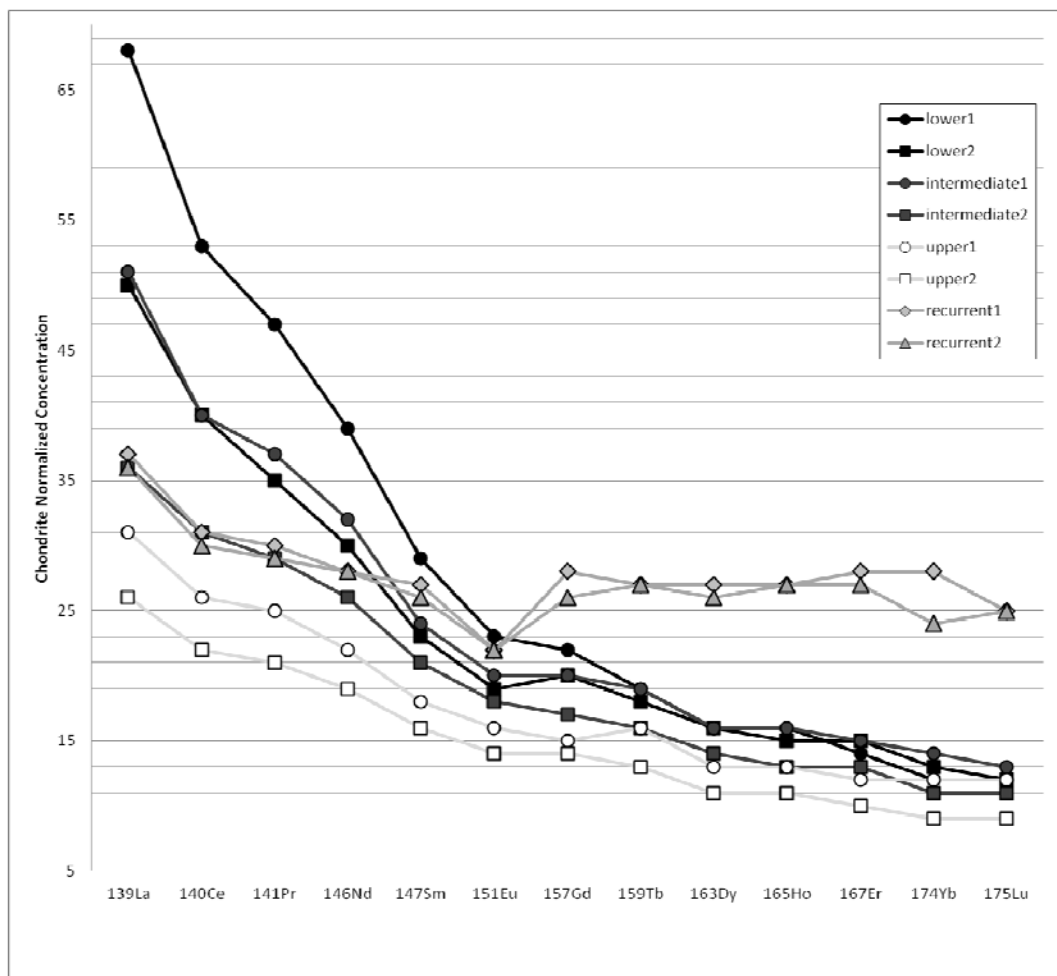


Grafico 3.10) Concentrazioni Lantanidi normalizzate alle condriti: sonostati presi i valori massimi(1) e minimi(2) di ogni unità.

In seguito inseriamo la tabella 1, nella quale vengono mostrati i calcoli della funzione “non-modal batch melting”, ed il grafico 3.11, in cui abbiamo inserito i dati delle unità e la funzione che ci indica come frazionano La e Yb in base al grado di fusione e al tipo di mantello.

Tabella 1) Calcolo frazionamento di La e Yb per estrazione di magmi da due mantelli diversi.

CALCOLO VARIAZIONE La e Yb TEORICA										
PERIDOTITE A GRANATO					PERIDOTITE A SPINELLO					
Minerale	Olivina	cpx	opx	Granato	Minerale	Olivine	Clinopiro sseno	Ortopiros seno	Spinello	
Modal %	0,6	0,15	0,2	0,05	Modal %	0,6	0,15	0,2	0,05	
P	0	0,4	0,1	0,5	P	0	0,4	0,2	0,4	
Concentrazioni nel mantello iniziale, C(0)										
				La	Sm	Yb				
				ppm	0,66	0,41	0,44			
Coefficiente di distribuzione										
		Olivina	cpx	opx	Spinello	Granato				
		La %	0,001	0,15	0,01	0,01	0,1			
		Sm %	0,001	0,3	0,01	0,01	0,5			
		Yb %	0,001	0,8	0,01	0,01	2			
$C(L)/C(0) = 1/[D0+F(1-P)]$										
peridotite granato					peridotite spinello					
F	La	Yb	La/Yb		F	La	Yb	La/Yb		
0,01	16,92742	2,005561	8,440241		0,01	18,88952	3,388525	5,574556		
0,02	13,78446	2,035341	6,772556		0,02	14,90515	3,221083	4,627371		
0,03	11,62586	2,066019	5,62718		0,03	12,30884	3,069411	4,010164		
0,04	10,05178	2,097635	4,791959		0,04	10,48285	2,931379	3,57608		
0,05	8,853119	2,130235	4,155936		0,05	9,128631	2,805228	3,254149		
0,06	7,909875	2,163863	3,655441		0,06	8,084272	2,689487	3,005879		
0,07	7,148273	2,198571	3,251327		0,07	7,254342	2,582918	2,808584		
0,08	6,520451	2,23441	2,918198		0,08	6,578947	2,484472	2,648026		
0,09	5,994006	2,271437	2,638861		0,09	6,018603	2,393255	2,514819		
0,1	5,546218	2,309711	2,401261		0,1	5,546218	2,308499	2,402521		
0,11	5,160685	2,349298	2,196692		0,11	5,14259	2,229541	2,306568		
0,12	4,825267	2,390265	2,018716		0,12	4,793725	2,155806	2,223635		
0,13	4,530789	2,432686	1,862463		0,13	4,489185	2,086792	2,151238		
0,14	4,270186	2,476641	1,724185		0,14	4,221028	2,022059	2,08749		
0,15	4,037932	2,522213	1,600948		0,15	3,983102	1,961221	2,030929		

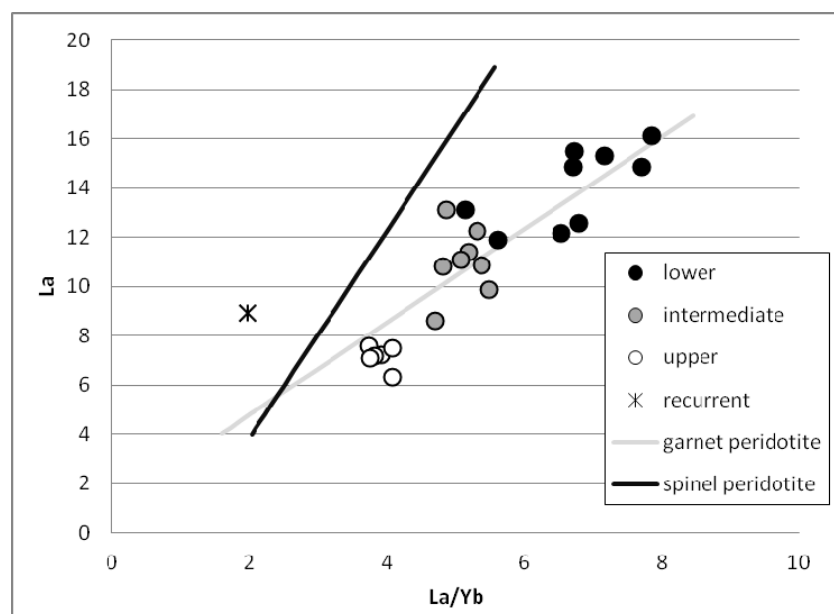


Grafico 3.11) Dati La-Yb colate vs curve teoriche di frazionamento

Il differente frazionamento è dovuto alla differente compatibilità dei Lantanidi nei minerali.

Nel granato i Lantanidi pesanti sono più compatibili che nello spinello.

Quindi i fusi prodotti da un mantello a granato risultano impoveriti in Lantanidi pesanti rispetto a quelli generati da un mantello a spinello.

3.1.3 Analisi dati isotopi

Dai valori isotopici misurati ed i conseguenti rapporti sono stati calcolati i rapporti di 200Ma fa, cioè di quando sono state messe in posto le rocce delle colate.

Tabella 2) Rapporti isotopici misurati e calcolati a 200Ma.

	Serie inferiore			Serie intermedia			
	AN 32	AN 49	AN 134	AN 18	AN 39	AN 138	AN 160
87Sr/86Sr misurato	0,707263	0,707324	0,706812	0,70725	0,70771	0,7076	0,707379
87Sr/86Sr 200Ma	0,706218138	0,706351406	0,705827709	0,706056485	0,705987457	0,70619148	0,706078367
143/144Nd misurato	0,512543	0,512565	0,512578	0,512455	0,51249	0,512465	0,512556
143/144Nd 200 Ma	0,512348	0,512371	0,512383	0,512253	0,512291	0,512269	0,512346
εNd 200 Ma	-0,62	-0,18	0,06	-2,47	-1,73	-2,17	-0,67
206Pb/204Pb misurato	18,631	18,691	18,62	18,627	19,267	18,637	18,71
207Pb/204Pb misurato	15,658	15,643	15,633	15,673	15,674	15,662	15,687
208Pb/204Pb misurato	38,659	38,751	38,742	38,822	36,707	38,812	38,896
206Pb/204Pb 200Ma	18,36	18,35	18,30	18,35	18,9555448	18,28	18,40
207Pb/204Pb 200Ma	15,64	15,63	15,62	15,66	15,65823399	15,64	15,67
208Pb/204Pb Ma	38,28	38,29	38,25	38,41	36,26781574	38,30	38,42
	Serie superiore			Serie ricorrente			
	AN 22	AN 141		AN24	AN 44	AN 156 A	AN 169
87Sr/86Sr misurato	0,706115	0,706248		0,705263	0,70595	0,705569	0,705569
87Sr/86Sr 200Ma	0,705520447	0,70558747		0,704920368	0,705284057	0,705040482	0,705061622
143/144Nd misurato	0,512543	0,512547		0,512683	0,512683	0,512724	0,512689
143/144Nd 200 Ma	0,512329	0,512334		0,512443	0,512447	0,512480	0,512448
εNd 200 Ma	-0,99	-0,90		1,22	1,31	1,95	1,33
206Pb/204Pb misurato	18,57	18,52		18,922	18,828	18,938	18,979
207Pb/204Pb misurato	15,63	15,62		15,658	15,676	15,67	15,679
208Pb/204Pb misurato	38,68	38,49		38,856	38,834	38,963	39,038
206Pb/204Pb 200Ma	18,24	18,27		18,65	18,45	18,61	18,55
207Pb/204Pb 200Ma	15,61	15,61		15,64	15,66	15,65	15,66
208Pb/204Pb Ma	38,22	38,14		38,50	38,42	38,54	38,51

Dal grafico $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ si può notare che dall'unità inferiore a quella ricorrente si ha:

- una diminuzione del rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, che riflette il comportamento incompatibile del ^{87}Rb .
- un aumento del rapporto $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, che riflette il comportamento dell'elemento Sm, il quale risulta meno incompatibile dell'elemento Nd sia durante la fusione del mantello che durante l'evoluzione crostale.

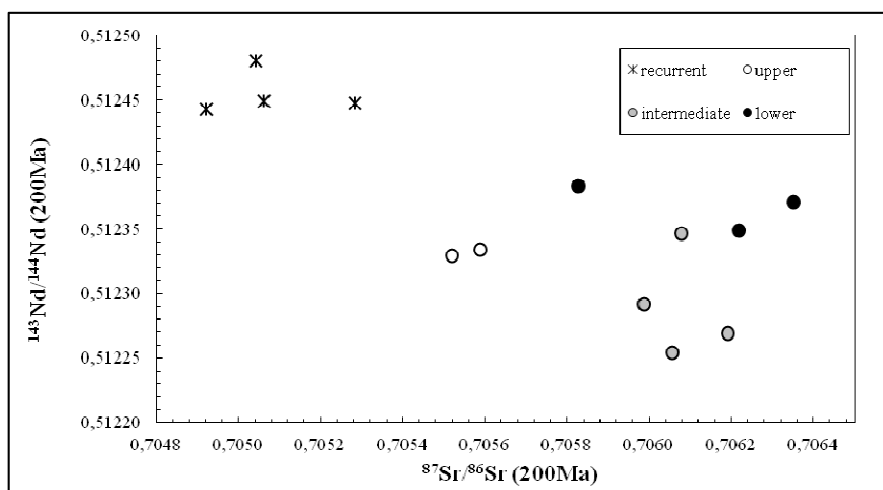


Grafico 3.12) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(200\text{Ma}) - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(200\text{Ma})$

Normalizzando i valori di Nd alle condriti si trova:

$$\epsilon\text{Nd} = 10^4 \times [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{condriti}}] / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{condriti}} .$$

Questo valore è molto utile perché ci permette di vedere come i valori variano in base alla composizione iniziale terrestre ($\epsilon\text{Nd}=0$).

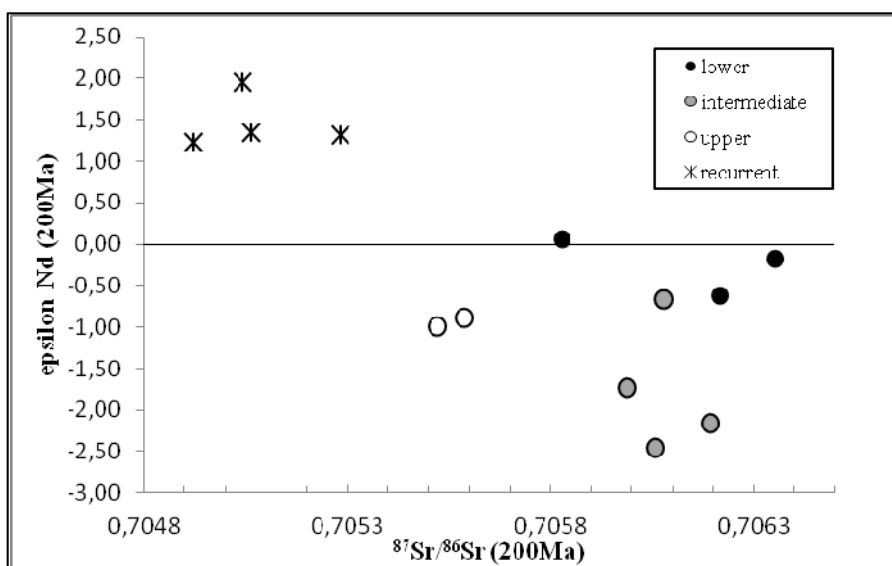


Grafico 3.13) $\epsilon\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Si nota che generalmente le unità inferiore, intermedia e superiore hanno valori di ϵNd negativi, mentre l'unità ricorrente ha valori positivi.

Nei grafici $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ i rapporti diminuiscono dall'unità inferiore a quella superiore, mentre per la unità ricorrente si ha un grande aumento rispetto alle altre unità.

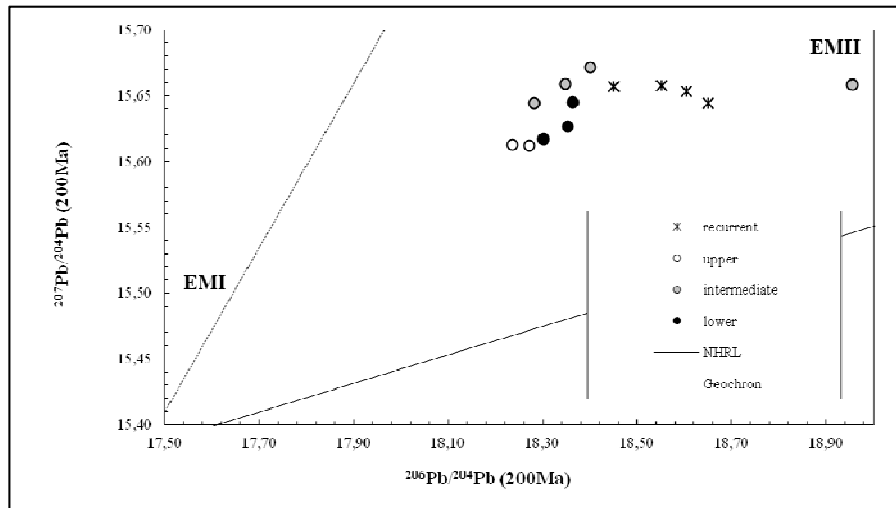


Grafico 3.14) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

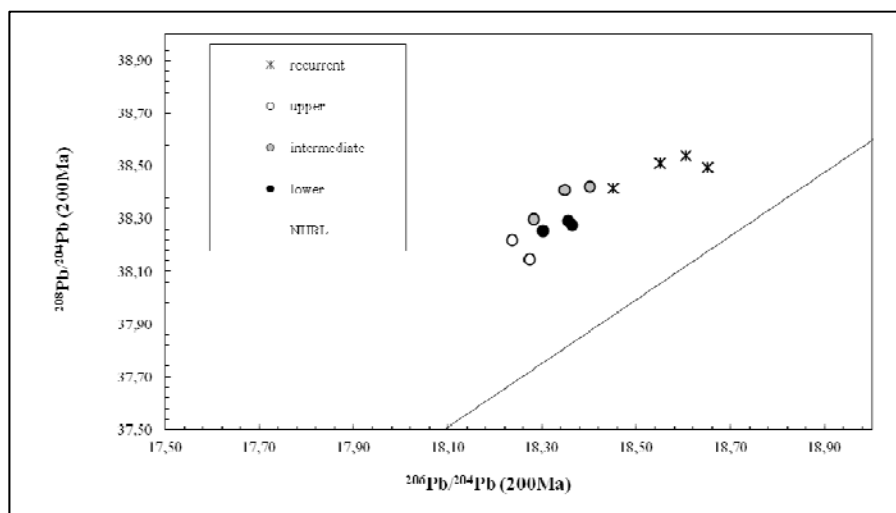


Grafico 3.15) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

4. GEOCHIMICA DEI DICCHI E I SILL DELL'ANTI-ATLANTE E CORRELAZIONE CON LE COLATE CAMP DELL'ALTO ATLANTE

In questo capitolo verranno correlati i dati delle colate dell'Alto Atlante con quelli ottenuti dai vari dicchi e sill dell'Anti-Atlante.

4.1. Dati elementi maggiori

Dal diagramma TAS possiamo notare che le composizioni generalmente variano da contenuti di SiO_2 compresi tra 49wt% e 56wt% (ad eccezione dei valori max e min dei campioni di Foun-zguid, relativamente 68,75 e 47,39wt%).

Per i campioni di Foun-Zguid si hanno da composizioni di andesiti basaltiche a quelle di basalti, mentre per i campioni del dicco Igherm da trachiandesiti basaltiche a basalti.

Le composizioni dei campioni di Foun-Zguid sono simili a quelle delle colate dell'Alto Atlante, mentre le composizioni del dicco Igherm si scostano dai valori delle colate, per l'alto contenuto in alcali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$), in media da ~2wt% a ~4wt% per le colate e da ~4,5wt% a ~7wt% per il dicco Igherm.

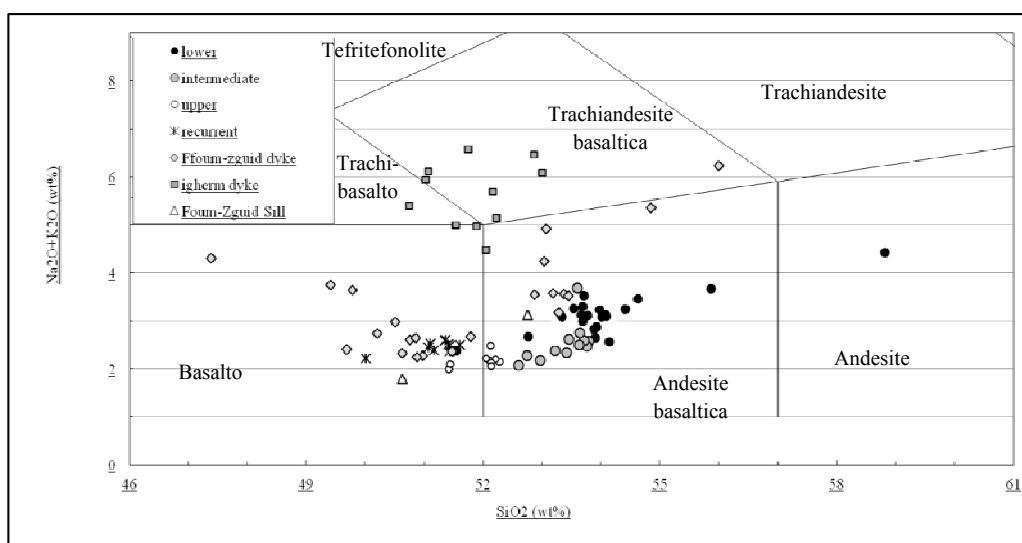


Grafico 5.1) diagramma TAS (Total Alkali Silica).

I valori di MgO per il dicco Igherm sono abbastanza fissi attorno al 4 wt%, mentre per i campioni di Foum-Zguid sono concentrati nel range da ~5 a 8 wt%.

I valori di $Mg\# = \left\{ \frac{[Mg]}{[Mg+Fe^{2+}]} \times 100 \right\}$, dove Fe^{2+} è uguale allo 0,85 Fe-totale, rispecchiano l'andamento del Mg, si nota quindi che i valori più elevati in Mg# sono dei campioni di Foum-Zguid.

Questi campioni, in particolare quelli dei sill, rappresentano i magmi meno evoluti (e/o meno differenziati).

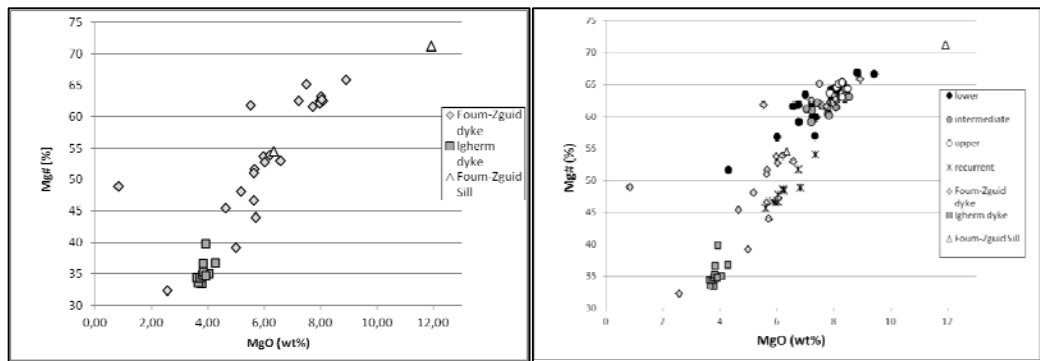


Grafico 5.2) grafici Mg# - MgO

Nei grafici di SiO₂-MgO, TiO₂-MgO, P₂O₅-MgO e Al₂O₃-MgO i dati dei campioni di Foum-Zguid seguono bene i dati delle colate, soprattutto quelle dell'unità superiore e della ricorrente, anche se generalmente mostrano un leggero deficit dei valori in ordinata (nel grafico SiO₂-MgO i valori di SiO₂ sono per lo più simili a quelli dell'unità ricorrente).

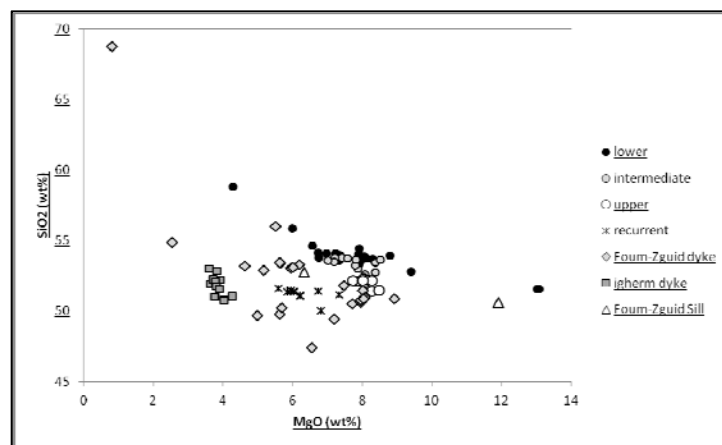


Grafico 5.3) SiO₂ - MgO

I dati del dicco Igherm di SiO_2 e TiO_2 sono molto simili a quelli dell'unità ricorrente, anche se a differenza di questa, hanno dei valori di MgO minori ($\sim 2\text{wt}\%$). I valori di P_2O_5 e Al_2O_3 si distaccano da tutti i valori delle colate.

Nel grafico P_2O_5 - MgO i valori delle colate e dei campioni di Foun-Zguid formano un gruppo con range di P_2O_5 da $\sim 0,07$ a $\sim 0,20$ wt%, mentre i valori del dicco Igherm si posizionano tra $\sim 0,27$ e $\sim 0,32$ wt%.

Nel grafico Al_2O_3 - MgO i valori delle colate e del dicco Foun-Zguid stanno nel range di Al_2O_3 da $\sim 13,5$ a $\sim 15,2$ wt%, mentre quelli del dicco Igherm si posizionano quasi tutti attorno al $12,7$ wt%.

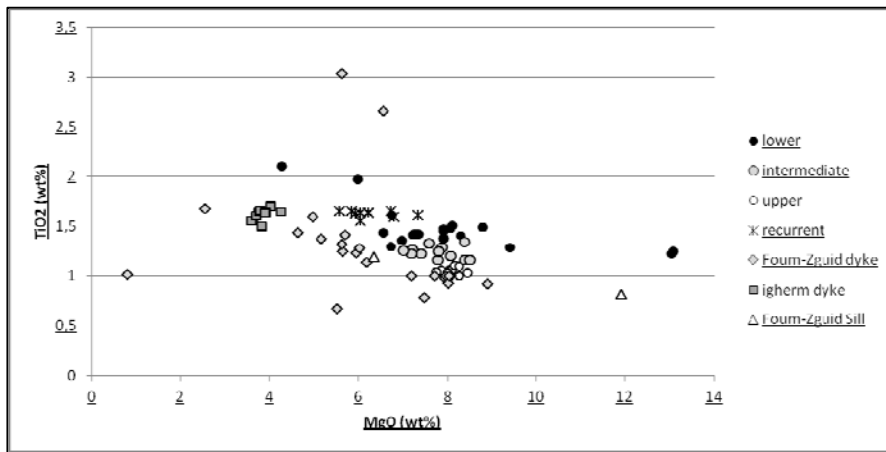


Grafico 5.4) TiO_2 - MgO

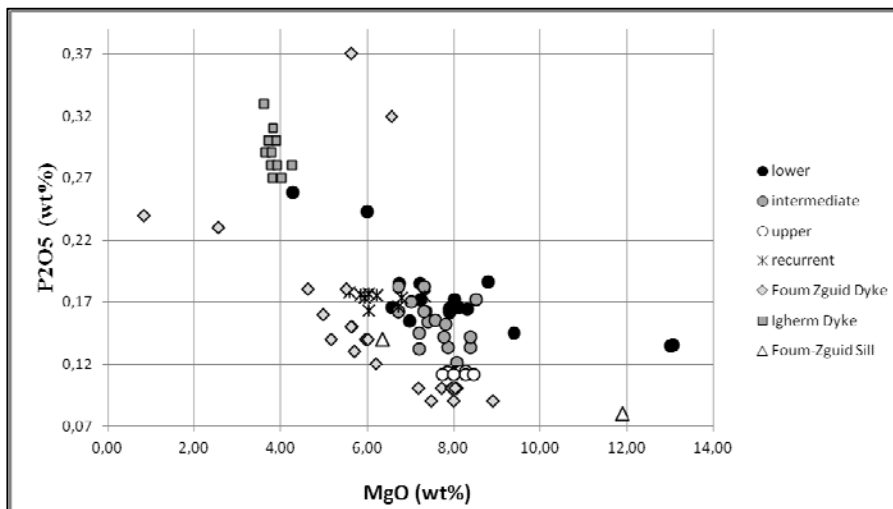


Grafico 5.5) P_2O_5 - MgO

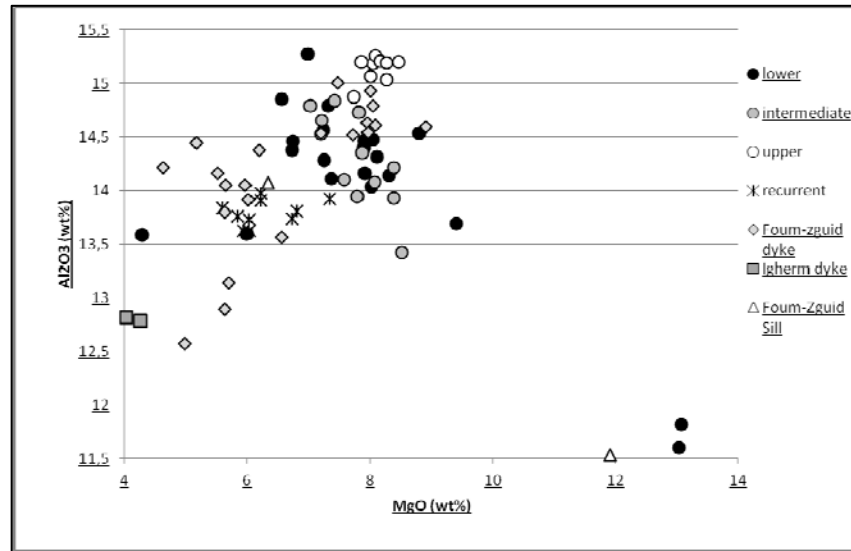


Grafico 5.6) Al₂O₃ - MgO

4.2. Dati elementi in traccia

I dati di Ni e Cr dei campioni di Fom-Zguid occupano una vasta gamma di valori, con un range di ~300ppm per il Cr e di ~100ppm per il Ni, seguendo bene i valori delle colate. Invece i dati del dicco Igherm sono molto bassi e si scostano da tutti gli altri valori.

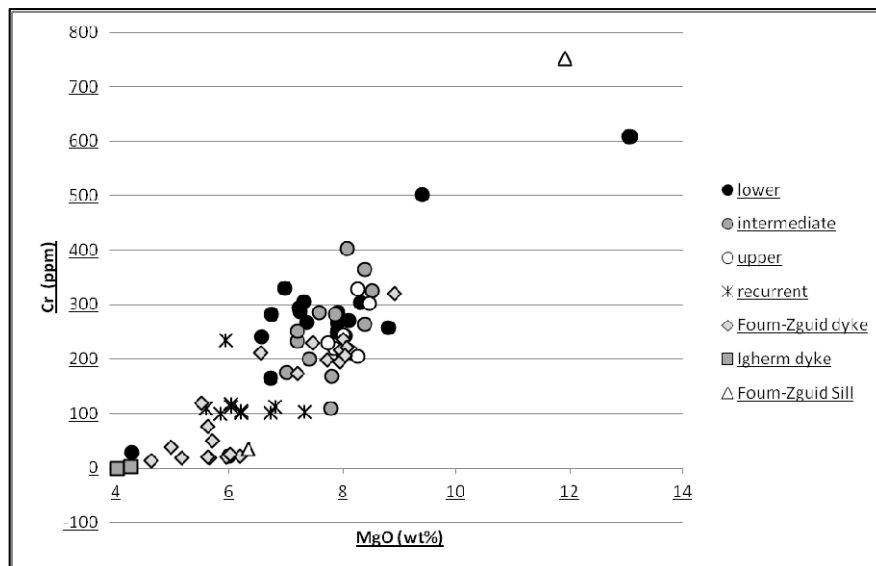


Grafico 5.7) Cr - MgO

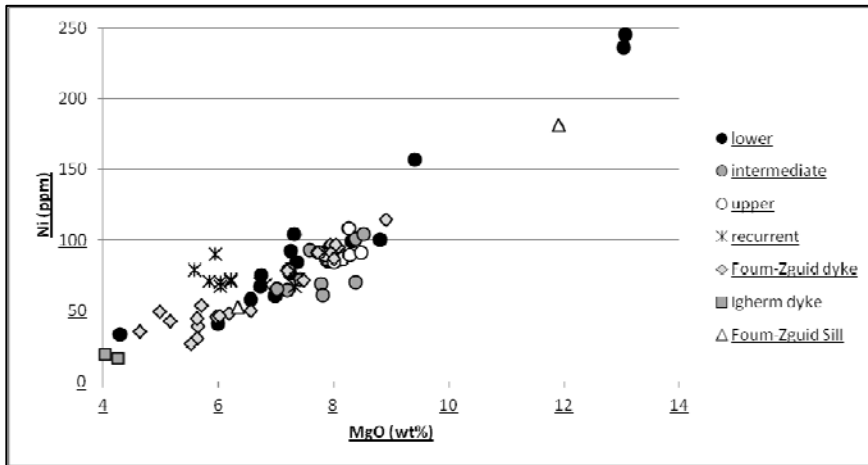


Grafico 5.8) Ni - MgO

I grafici La-La/Yb, La-Rb e La-Sr mostrano una certa somiglianza tra i valori dei campioni di Fourn-Zguid e dell'unità superiore.

I valori del dicco Igherm sono sempre molto diversi da quelli delle colate: sono molto più arricchiti in La e quindi in elementi incompatibili. Di fatto nel grafico La-Rb si ha un completo distacco dai valori delle colate.

Invece, sempre per il dicco Igherm, i valori di Sr concordano circa con i valori più bassi dell'unità inferiore mentre il rapporto La/Yb concorda con i valori più alti della stessa unità.

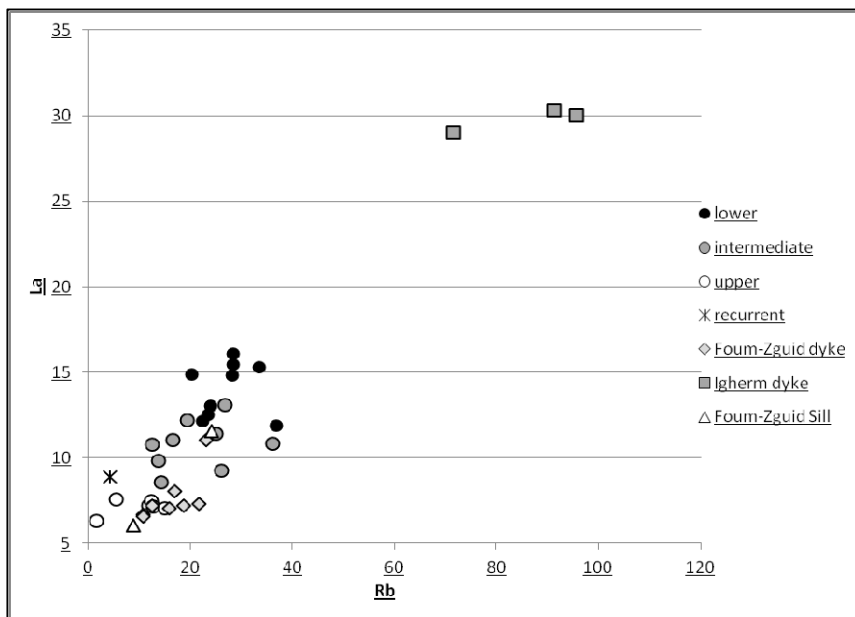


Grafico 5.9) La - Rb

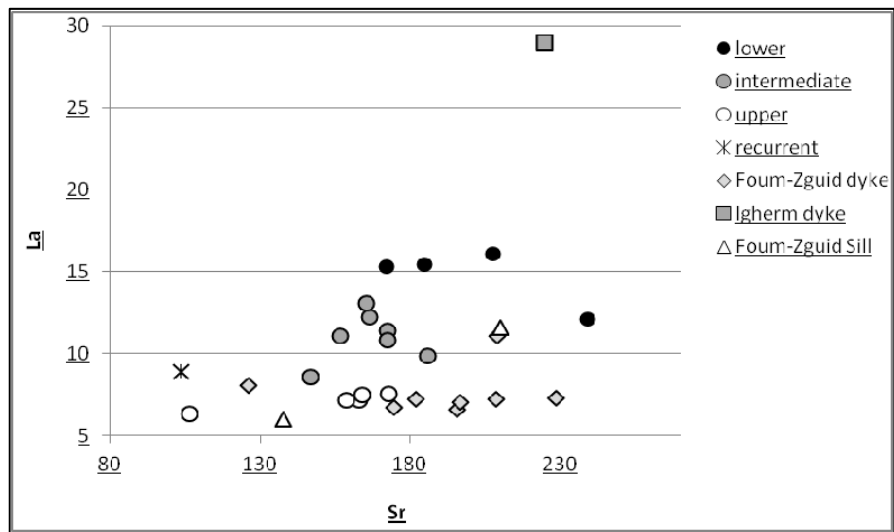


Grafico 5.10) La - Sr

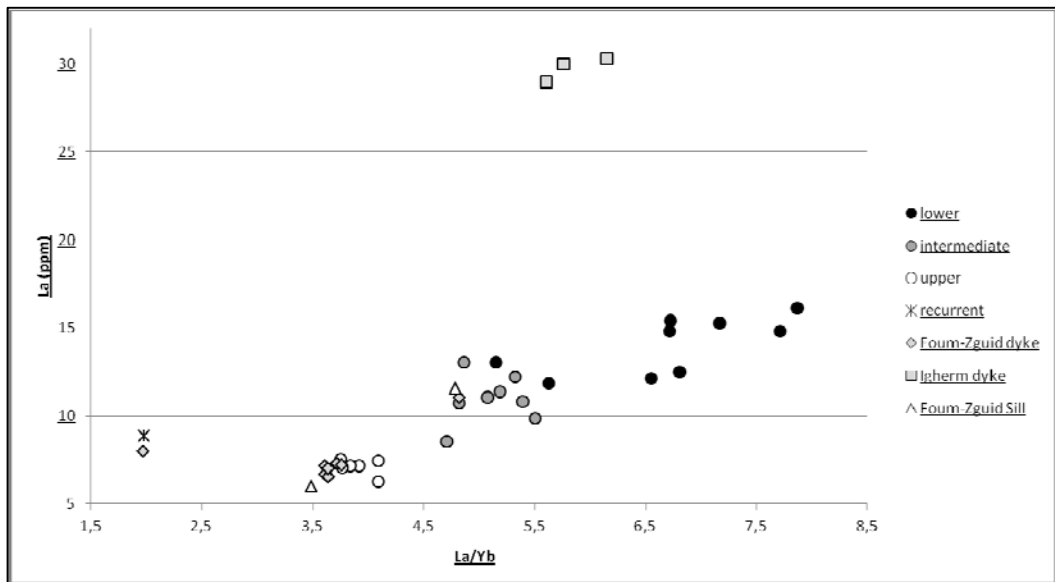


Grafico 5.11) La - La/Yb

4.3. Dati isotopi

Dal nostro lavoro siamo riusciti ad ottenere i dati isotopici di Sr, Nd e Pb di 5 campioni della zona di Foug-Zguid, di cui tre corrispondenti al dicco e due ai sill.

Tab. 5.1) Rapporti isotopici e coordinate dei campioni AN709, AN724, AN725, AN730 e AN734. Il campione AN725 non è stato prelevato con le coordinate, proviene dalle vicinanze del campione 724 ed è un piccolo sill.

	Foug Zguid dyke			Foug Zguid Sill	
	AN 709	AN 724	AN 734	AN 725	AN 730
87Sr/86Sr misurato	0,706044389	0,705879405	0,707639229	0,706177375	0,707179275
87Sr/86Sr 200Ma	0,705449895	0,705213529	0,705916858	0,705516911	0,705985879
143/144Nd misurato	0,512532749	0,512672746	0,51247975	0,512536749	0,512444751
143/144Nd 200 Ma	0,512419	0,512437	0,512360	0,512423	0,512330
εNd 200 Ma	0,96	1,31	-0,20	1,04	-0,77
206Pb/204Pb misurato	18,53	18,790344	19,228466	18,48	18,589746
207Pb/204Pb misurato	15,60	15,644648	15,642652	15,59	15,641654
208Pb/204Pbmisurato	38,60	38,756332	36,633586	38,41	38,744356
206Pb/204Pb 200Ma	18,20	18,41	18,91763371	18,24	18,31
207Pb/204Pb 200Ma	15,58	15,63	15,62691752	15,58	15,63
208Pb/204Pb Ma	38,14	38,34	36,19528011	38,07	38,33
coordinate	30°41'31"N 6°12'15"W	29°48'27"N 7°8'45"W	30°7'8"N 6°52'48"W	non conosciute	29°51'27"N 7°15'58"W



Fig. 5.1) Geolocalizzazione dei campioni AN709, AN724, AN730 e AN734. Il campione AN725 si trova nei paraggi del campione AN730 (cioè circa 15km a Nord-ovest del campione AN724). La linea rossa mostra l'andamento del dicco Foug-Zguid. Immagine presa da Google Earth.

4.3.1 Preparazione dei campioni

I campioni sono stati macinati con la pressa Guttenberg del dipartimento di Geoscienze di Padova.

I campioni non sono stati macinati normalmente, ma sono stati interposti tra due strati di plexyglass dello spessore di 1,5cm. Il plexyglass è stato utilizzato come separatore tra il campione e la pressa, per evitare eventuali contaminazioni dei valori isotopici del Pb.

I campioni macinati sono stati osservati con un normale microscopio a luce diretta per la selezione dei campioni non alterati e non contaminati dalla sega utilizzata in precedenza per tagliare le rocce.

La selezione è stata mandata a Ginevra per l'analisi in spettrometria di massa.

4.3.2 Analisi dei dati

I dati del diagramma $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mostrano che i valori dei campioni di Fourn-Zguid si accostano ai valori più bassi di $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dell'unità intermedia e a quelli più alti della ricorrente.

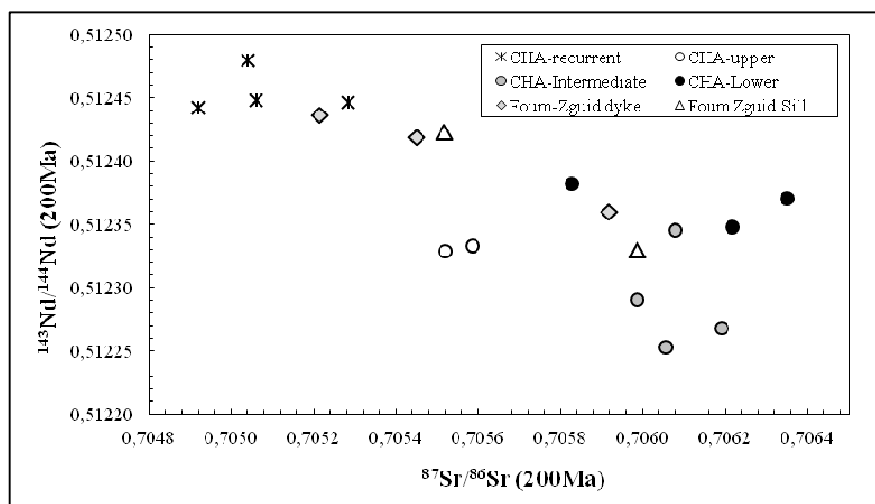


Grafico 5.12) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Nel grafico $\epsilon\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ si nota che i campioni di Fourn-Zguid mostrano sia valori negativi che valori positivi, come le colate CAMP dell'Alto Atlante.

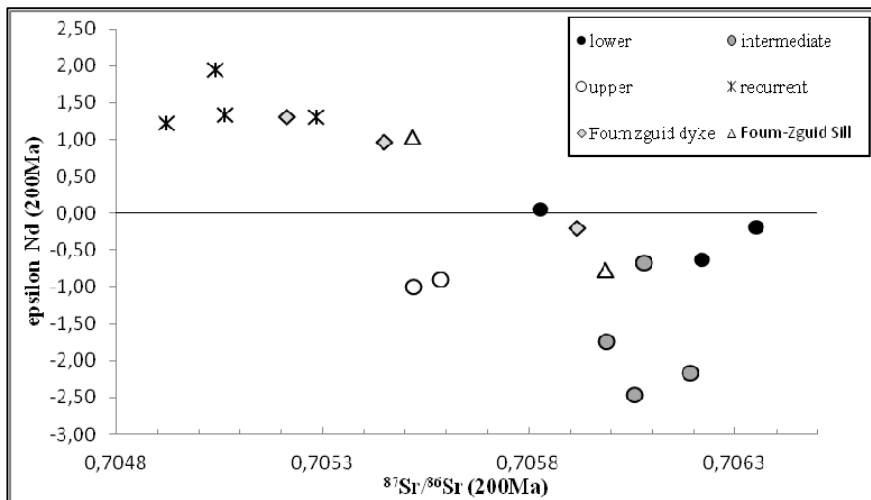


Grafico 5.13) $\epsilon Nd - {}^{87}Sr/{}^{86}Sr$.

Il grafico ${}^{207}Pb/{}^{204}Pb - {}^{206}Pb/{}^{204}Pb$ ci mostra che i valori dei campioni del dicco Foum-Zguid seguono quelli dell'unità inferiore e superiore, tranne il campione AN 734 che si posiziona vicino al campione AN39 dell'unità intermedia a valori del rapporto ≈ 19 .

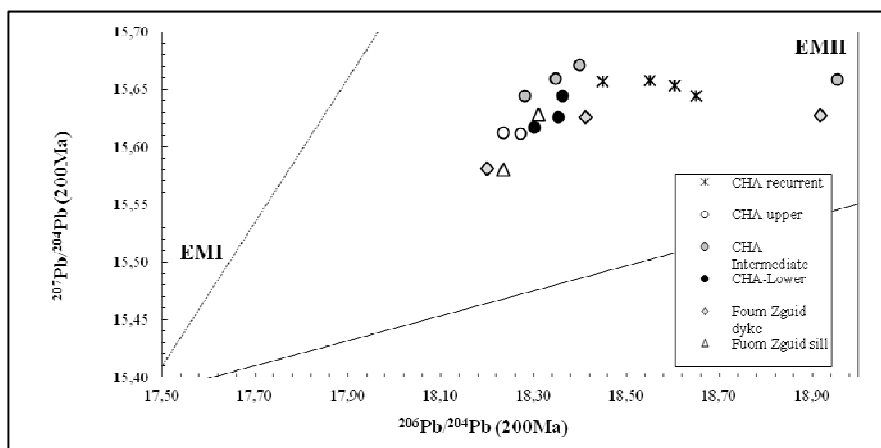


Grafico 5.14) ${}^{207}Pb/{}^{204}Pb - {}^{206}Pb/{}^{204}Pb$.

Il grafico ${}^{208}Pb/{}^{204}Pb - {}^{206}Pb/{}^{204}Pb$ mostra dei valori del dicco Foum-Zguid che concordano nuovamente (come nel grafico ${}^{207}Pb/{}^{204}Pb - {}^{206}Pb/{}^{204}Pb$) con le unità inferiore e superiore, allontanandosi di nuovo dai valori dell'unità ricorrente.

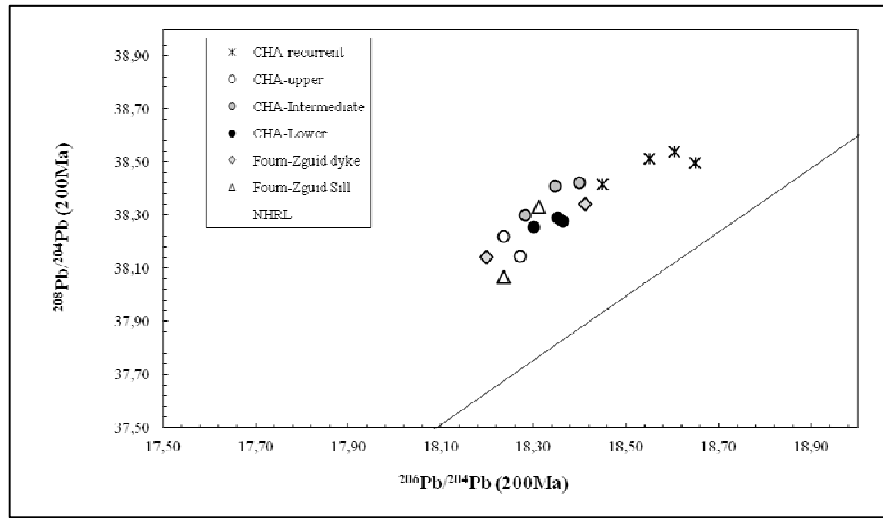


Grafico 5.15) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.

5. CONCLUSIONI

In conclusione sono stati analizzati i dicchi, Foum-Zguid ed Igherm, ed i sill del Anti-Atlante, e sono stati confrontati con i dati dei campioni della colate dell'Alto Atlante

Dalle analisi degli elementi maggiori notiamo una buona somiglianza tra i valori dei campioni di Foum-Zguid e le colate CAMP dell'Alto Atlante.

In particolare dalle analisi degli elementi in traccia si nota che i campioni di Foum-Zguid sono per lo più concordanti con l'unità intermedia e quella superiore delle colate.

I valori degli elementi maggiori ed in traccia del dicco Igherm, appaiono del tutto estranei ai valori delle colate CAMP dell'Alto Atlante suggerendo che questo dicco non sia parte dell'evento CAMP.

Per questo non sono state svolte analisi isotopiche sui campioni di questo dicco.

I grafici, sviluppati con i rapporti isotopici di Nd, Sr e Pb, mostrano che i campioni di Foum-Zguid concordano con le prime tre unità delle colate CAMP dell'Alto Atlante. Eccezione fatta per il valore di $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ che ci indica una relazione con l'unità ricorrente.

Quindi, dalle analisi geochimiche degli ementi maggiori, degli elementi in traccia e degli isotopi di Nd, Sr e Pb, possiamo concludere che il dicco e i sill di Foum-Zguid molto probabilmente hanno alimentato le colate CAMP dell'Alto Atlante, in particolare quelle dell'unità intermedia e quelle dell'unità superiore.

BIBLIOGRAFIA

- Marzoli, A., Renne, P.R., Picirillo, E.M., Ernesto, M., De Min, A., 1999. Extensive 200-Million-year-old continental flood basalts of the Central Atlantic Magmatic Province. *Science* 284, 616–618.
- Marzoli, A., Bertrand, H., Knight, K., Cirilli, S., Buratti, N., Verati, C., Nomade, S., Renne, P.R., Youbi, N., Martini, R., Allenbach, K., Neuwerth, R., Rapaille, C., Zaninetti, L., Bellieni, G., 2004. Synchrony of the Central Atlantic magmatic province and the Triassic–Jurassic boundary climatic and biotic crisis. *Geology* 32, 376–973.
- Michard, A., Frizon de Lamotte, D., Saddiqi, O., Chalouan, A., 2008. Continental Evolution: The Geology of Morocco, chapter 1 “An Outline of the Geology of Morocco”. *Lecture Notes in Earth Science* 116. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Michard, A., Hoepffner, C., Soulimani, A., Baidder, L., 2008. Continental Evolution: The Geology of Morocco, chapter 3 “The Variscan Belt”. *Lecture Notes in Earth Science* 116. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Silva, P.F., Marques, F.O., Henry, B., Madureira, P., Hirt, A.M., Font, E., Lorenzo, N., 2010. *Journal of geophysical research* 115, B12108, 1-26.
- Silva, P.F., Marques, F.O., Henry, B., Mateus, A., Lorenço, N., Miranda, J.M., 2004- Preliminary results of a study of magnetic properties in the Fom-Zguid dyke (Morocco). *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 909-920.